İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜNEŞ ARABASI YARIŞ SİMÜLASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Onur SERİN

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Programı : Otomotiv

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet GÜNEY

Öğr.Gör.Dr Orhan ATABAY

Haziran 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜNEŞ ARABASI YARIŞ SİMÜLASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Onur SERİN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05 Mayıs 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 09 Haziran 2011

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet GÜNEY (İTÜ)

Eş Danışman : Öğr. Gör. Dr. Orhan ATABAY (İTÜ)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Metin ERGENEMAN (İTÜ)

Prof. Dr. İrfan YAVAŞLIOL (YTÜ)

Yrd. Doç. Dr. Tarkan SANDALCI (YTÜ)

Haziran 2011

İTÜ Güneş Arabası Ekibi'ne,

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasına vesile olan İTÜ Güneş Arabası Ekibi ARIBA Projesi hem lisans hem de lisansüstü eğitimim boyunca teorik bilgileri pratiğe dönüştürebilme şansı tanıması, disiplinler arası bir ekip çalışması imkanı sunması nedenleriyle hayatımda çok önemli bir yere sahip olmuştur. ARIBA IV ve ARIBA V projeleri süresince kazandığım tecrübeler mühendislik hayatımın temel taşlarını oluşturacaktır.

Eğitim hayatım süresince maddi ve manevi olarak sürekli yanımda olan, benden desteğini hiç esirgemeyen aileme teşekkürü borç bilirim.

ARIBA V projesi bünyesinde tasarlanan aracın dinamik sınırlanın belirlenmesi ve strateji oluşturma gereksinimi ile başladığım bu tez çalışması süresince desteğini esirgemeyen başta tez danışmanım Öğr.Gör.Dr.Orhan ATABAY'a, simülasyon yazılımının ilk tohumlarını beraber attığım Egemen AYAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Onur SERİN

Mayıs 2011 Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ viiii
İÇİNDEKİLER ixx
KISALTMALAR xi
ÇİZELGE LİSTESİ xiii
ŞEKİL LİSTESİ xv
ÖZET xix
SUMMARY xxi
1. GİRİŞ 1
2. ÇIKIŞ NOKTASI VE AMAÇ 3
3. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMİ 5
3.1 Tarihçe 6
3.2 Türkiye'de Güneş Enerjisi Potansiyeli 7
3.3 Güneş Enerji Sisteminin Temel Yapısı 8
3.4 Güneş Pilleri 8
3.4.1 Yapısal Özellikleri 8
3.4.2 Çeşitleri 11
3.4.3 Kayıpları 12
3.4.3.1 Işıksal kayıplar 13
3.4.3.2 Elektriksel kayıplar 13
3.4.4 Elektriksel Eşdeğer Devresi 14
3.4.5 Uygulama Alanları 15
3.5 Güneş Enerjisi Kullanımının Faydaları 16
4. GÜNEŞ ARABASI 19
4.1 Güneş Arabası Nedir? 19
4.2 Güneş Arabası Nasıl Çalışır? 23
4.2.1 Güneş Panelleri 24
4.2.2 Maksimum Güç Noktası Takipçisi (MPPT) 24
4.2.3 Motor 25
4.2.4 Motor Sürücü 26
4.2.5 Akü 26
4.2.6 Elektronik Devreler 27
5. GÜNEŞ ARABALARI YARIŞLARI 29
5.1 TÜBİTAK Formula G 29
5.2 World Solar Challenge 32
6. YARIŞ SİMÜLASYONU 35
6.1 Pist Yarışı 35
6.1.1 IPG/CarMaker Seyir Dinamiği Simülasyon Programı ve Oluşturulan Model 35
6.1.2 Simülasyon Programındaki Sanal Sürücü 37

6.1.3 Sanal Sürüş Dinamiği Alanı Avustralya'daki Kualifikasyon Pisti 37
6.1.4 Simülasyon Koşulları ve Simülasyonlar 38
6.1.4.1 Standart Manevralar 38
6.1.4.2 Pist Koşuları ve Sonuçları 43
6.2 Çok Dönemeci Olmayan Uzun Yol Yarışı 45
6.2.1 Araç Modeli 45
6.2.1.1 Motor Modeli 45
6.2.1.2 Yük Modeli 47
6.2.2 Yol Modeli 52
6.2.3 Göze Modeli 54
6.2.3.1 Verim Düşümü Hesabı 57
6.2.3.2 W/m^2 Cinsinden Güç Hesabı 59
6.2.3.3 MPPT Çıkışlarındaki Toplam Akım Hesabı 62
6.2.4 Akü Modeli 66
6.2.5 Gün ve Saat Hesabı 67
6.2.6 Kontrol Noktası Bekleme Süresi Hesabı 67
7. WSC'DE (WORLD SOLAR CHALLENGE) YARIŞ STRATEJİSİ 69
7.1 Yarış Stratejisi Nedir? 69
7.2 Strateji Oluşturma 70
7.2.1 Ölçüm Sistemi: 71
7.2.2 Strateji Simülasyon Yazılımı 73
7.2.3 Kontrol Algoritması 74
7.3 Yarış Stratejisi Neden Gereklidir? 75
8. YARIŞ STRATEJİSİ GELİŞTİRME 79
8.1 Yarış Öncesi Strateji Geliştirme 79
8.1.1 Hız Kontrolü 79
8.1.1.1 Günlük Ortalama Sabit Hız Stratejisi 79
8.1.1.2 Kontrol Noktaları Arasında Farklı Sabit Ortalama Hız Stratejisi 82
8.1.2 Tork Kontrolü Stratejisi 83
8.2 Yarış Sırasında Strateji Geliştirme 85
8.2.1 Bulanık Kontrolör 85
8.2.2 Optimal Kontrol 88
8.2.2.1 Model 88
8.2.2.2 Stratejiler 89
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 91
KAYNAKLAR 93
ÖZGEÇMİŞ 95

KISALTMALAR

CAN **:** Control Area Network
GaAs **:** Galyum Arsenit
GAE **:** Güneş Arabası Ekibi
GPIO **:** General Purpose Input Output
İTÜ **:** İstanbul Teknik Üniversitesi
LTC **:** Pasif Balanslama Yapan Tümdevre
MIT **:** Massachusetts Institute of Technology
MPPT **:** Maximum Power Point Tracker
NiCd **:** Nikel Kadminyum
NiMH **:** Nikel Metal Hidrit
RTC **:** Reel Time Clock
SOC : State of Charge
WSC **:** World Solar Challenge

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 Türkiye'nin Aylık Ortalama Güneş Enerjisi Potansiyeli..... 7
Çizelge 3.2 Türkiye'nin Yıllık Toplam Güneş Enerjisi Potansiyelinin Bölgelere Göre Dağılımı 8
Çizelge 4.1 Güneş Arabası ile 4 Çeker Araç Karşılaştırması [7]..... 20
Çizelge 4.2 İTÜ Güneş Arabası Ekibi'nin 5 Numaralı Aracı ARIBA V'in Teknik Özellikleri [8] 21
Çizelge 4.3 İTÜ Güneş Arabası Ekibi'nin 5 Numaralı Aracı ARIBA V'in Elektriksel Özellikleri [8] 22
Çizelge 5.1 Formula G 2005 Yarış Sonuçları 30
Çizelge 5.2 Formula-G 2006 Ege Kupası Yarış Sonuçları 31
Çizelge 5.3 Formula-G 2006 Türkiye Kupası Yarış Sonuçları..... 31
Çizelge 5.4 Formula G'ya Katılan Takımlar 31
Çizelge 5.5 Formula-G 2007 Yarış Sonuçları Çizelgesu 31
Çizelge 5.6 Formula-G 2008 Yarış Sonuçları Çizelgesu 32
Çizelge 5.7 WSC 2007 ve 2009 Yarışlarını Kategorilerinde Birinci Olarak Tamamlayan Ekipler 33
Çizelge 5.8 WSC 2009 Yarışı katılımcılarının bir kısmı 34
Çizelge 6.1 Analiz Sonuçları ile Teorik Hesabın Karşılaştırılması 41
Çizelge 6.2 Temel Büyüklükler [14]..... 45
Çizelge 6.3 Nominal Güçte Performans Değerleri [14]..... 45
Çizelge 6.4 Maksimum Performans Değerleri [14] 46
Çizelge 6.5 Farklı Lastiklerin Yuvarlanma Direnç Katsayıları 49
Çizelge 6.6 Kullanılan Gözenin Karakteristik Özellikleri [19] 55
Çizelge 6.7 Bir Haftalık Zaman Diliminde 6 Farklı İstasyondaki Günlük Maksimum Güneş Parlaklığı 60
Çizelge 6.8 Güneş Parlaklığı Eğrilerinin Kullanıldığı Km Aralıkları..... 62
Çizelge 6.9 Kullanılan Akünün Özellikleri [21] 66
Çizelge 6.10 Kullanılacak Akünün İzin Verilen Ağırlığa Göre Boyutlandırılması... 66
Çizelge 8.1 Günlük Referans Hız Değerleri 80
Çizelge 8.2 Günlük Alınan Yollar 81
Çizelge 8.3 Kontrol Noktaları Arasındaki Referans Hızlar 82
Çizelge 8.4 Günlük Alınan Mesafeler..... 83

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 Temel Güneş Enerjisi Sistemi 6
Şekil 3.2 Güneş Gözeleri 9
Şekil 3.3 Güneş Paneli 9
Şekil 3.4 PN Eklemin Oluşması 10
Şekil 3.5 Güneş Gözesi Çalışma İlkesi 11
Şekil 3.6 Güneş Gözesinin Elektriksel Eşdeğer Devresi 14
Şekil 3.7 Evlerde ve Uydularda Güneş Pili Kullanımı 16
Şekil 3.8 Güneş Enerjili elektrik Santrali ve Sinyalizasyon 16
Şekil 4.1 İTÜ Güneş Arabası Ekibi'nin 4 Numaralı Aracı: ARIBA IV 20
Şekil 4.2 ARIBA V 22
Şekil 4.3 İTÜ Güneş Arabası Ekibi'nin 2 Numaralı Aracı ARIBA 2 & 3 Boyutlu Çizimi 23
Şekil 4.4 Bir Güneş Arabasının Temel Tahrik Elemanlarının Şematik Gösterimi 23
Şekil 4.5 ARIBA IV'ün Güneş Gözeleri 24
Şekil 4.6 MPPT 24
Şekil 4.7 Tekerlek içi Motorun Patlatılmış Görüntüsü 25
Şekil 4.8 Motor Sürücüsü 26
Şekil 4.9 ARIBA IV'te Kullanılan Akülerin 3 Boyutlu Çizimi 27
Şekil 4.10 Merkezi Kontrol Devresi 27
Şekil 4.11 Sürücü Bilgilendirme Devresi 27
Şekil 4.12 Sıcaklık Ölçüm Devresi 27
Şekil 5.13 İzmir Pınarbaşı Yarış Pisti 30
Şekil 5.14 WSC Yarış Rotası 32
Şekil 5.15 Pist Yarışının Yapıldığı Hidden Valley Yarış Pisti'nin Kuşbakışı Görüntüsü 33
Şekil 6.1 Programın Ana Ekranının Görüntüsü 36
Şekil 6.2 Taşıt Parametrelerinin Girildiği Ekranın Görüntüsü 36
Şekil 6.3 Sürücü Özelliklerinin Belirlendiği Ekran Görüntüsü 37
Şekil 6.4 Yarış Pistinin Üstten Görünüşü 38
Şekil 6.5 Yarış Pistinin IPG/CarMaker'da Tanımlanmış Hali 38
Şekil 6.6 Düz Yolda 50 Km/h Hızda Frenleme Testi 39
Şekil 6.7 Düz Yolda 50 Km/h Hızda Frenleme Testi Sonucu Arka Tekerlekten Ön Tekerleğe Yük Aktarımı 39
Şekil 6.8 50m Sabit Yarıçaplı Dönemeç Hareketi 40
Şekil 6.9 Sabit Yarıçaplı Dönemeç Testinin Çıktıları 40
Şekil 6.10 Slalom Testi 41
Şekil 6.11 Slalom Testi Parkur Geometrisi (CarMaker Pist Penceresi) 41
Şekil 6.12 Slalom Test Sonuçları 42
Şekil 6.13 Virajda Fren Testi Parkur Geometrisi 43
Şekil 6.14 Viraj İçinde Frenleme Anından İtibaren Aracın Davranışı 43

Şekil 6.15 Pist boyunca hız grafiği 44
Şekil 6.16 Yanal ivme 44
Şekil 6.17 Sabit Mıknatıslı Doğru Akım Makinesinin Şematik Diyagramı 46
Şekil 6.18 Motor Modeli 47
Şekil 6.19 Araca Etkiyen Kuvvetler 47
Şekil 6.20 Rüzgar Etkisi ile ilgili Blok 48
Şekil 6.21 Normal Bir Binek Araçta Düz Yolda Yuvarlanma Direnci İle Aerodinamik Dirençten Kaynaklanan Güç İhtiyacı 50
Şekil 6.22 Güneş Arabasında Düz Yolda Yuvarlanma Direnci İle Aerodinamik Dirençten Kaynaklanan Güç İhtiyacı 50
Şekil 6.23 Güneş Arabasının Kalkabileceği Maksimum Yol Eğimi Grafiği 51
Şekil 6.24 Yük Modeli 52
Şekil 6.25 Yol Boyunca Yükseklik Değişimi 53
Şekil 6.26 Yol Modeli 53
Şekil 6.27 On Kmlik Bir Kısımda Yükseklik Değişimi 54
Şekil 6.28 Modellenen Eğimin Çıkış Grafiği 54
Şekil 6.29 Güneş Gözesi I-V Karakteristiği 55
Şekil 6.30 Türkiye Global Radyasyon Değerlerinin Aylara Göre Değişimi 56
Şekil 6.31 Türkiye'de Aylara Göre Ortalama Güneşlenme Süreleri 56
Şekil 6.32 Göze Modeli 57
Şekil 6.33 Göze Modelinin Parçaları 57
Şekil 6.34 Avustralya Kıtasında Ekim Ayındaki Sıcaklık Dağılımı 58
Şekil 6.35 Verim Düşümü Hesap Bloğu 59
Şekil 6.36 4 Gün Boyunca Bulutluluk Değişimi 60
Şekil 6.37 Uydurulan Eğri 61
Şekil 6.38 Sıcaklık Ve Açıdan Bağımsız Panel Çıkış Gücünün Gün İçindeki Değişim Grafiği 61
Şekil 6.39 5 Farklı Konumdaki Güneş Parlaklıklarının Zamana Göre Değişimi [7] 61
Şekil 6.40 Güç Hesabı Simulink Modeli 62
Şekil 6.41 Güneş Gözesinin P - V Karakteristik Grafiği 63
Şekil 6.42 Güneş Gözesinin I - V Karakteristik Grafiği 63
Şekil 6.43 Göze Düzlemi ve Güneşin Geliş Açısı 64
Şekil 6.44 Yarış Süresince Güneş Işınlarının Geliş Açısı 64
Şekil 6.45 MPPT Verimi ile Giriş Gücü Arasındaki Bağıntı 65
Şekil 6.46 MPPT Çıkış Akımlarını Hesaplayan Model 65
Şekil 6.47 Akü Deşarj Karakteristiği 66
Şekil 6.48 Gün ve Saat Hesaplayan Blok 67
Şekil 6.49 Araca Dur veya Git Komutunu Veren Blok 68
Şekil 7.1 2001 ve 2003 NASC Yarış Rotası 69
Şekil 7.2 Honda Dream Car Strateji Oluşturma Sistemi Şeması [23] 71
Şekil 7.3 Ölçüm Devresi Şeması 71
Şekil 7.4 ARIBA V Batarya Yönetim ve Ölçüm Devresi 72
Şekil 7.5 Dashboard Devresi 72
Şekil 7.6 Yarış Sırasında Strateji Yazılımı Kullanıcı Arayüzünden Alınmış Bir Görüntü 73
Şekil 7.7 Matlab Simulink Modeli 74
Şekil 7.8 Aküyü Sürekli Deşarj Etme Stratejisi - Yol Boyunca Aküdeki Enerji Grafiği [24] 75
Şekil 7.9 Kontrol Noktaları da Göze Alındığında Akünün Boşalma Stratejisi [7] 76
Şekil 7.10 Akü Deşarj Testi Eğrisi 76

Şekil 7.11 Yokuş Geçme Stratejisi [20] 77
Şekil 8.1 Referansı Bloğunun İç Yapısı 80
Şekil 8.2 Yarış Boyunca Akü Enerjisinin Değişimi 80
Şekil 8.3 Tek Bir Akünün Akımının Grafiği 81
Şekil 8.4 Yarış Boyunca Araca Etki Eden Kuvvetlerin Değişimi 81
Şekil 8.5 Yarış Boyunca Akü Enerjisinin Değişimi 82
Şekil 8.6 Yarış Boyunca Aracın Hızı 83
Şekil 8.7 Yol Boyunca Akü Enerjisi Değişimi 84
Şekil 8.8 Yarış Boyunca Aracın Hızı 84
Şekil 8.9 Bulanık Kontrolörün Matlabdaki Temel Görünümü 85
Şekil 8.10 Üyelik fonksiyonunun yapısı 86
Şekil 8.11 Çıkış Üyelik Fonksiyonu 86
Şekil 8.12 Kural Çizelgesu 87
Şekil 8.13 Örnek sistem çıkışı 87

GÜNEŞ ARABASI YARIŞ SİMÜLASYONU

ÖZET

Bu çalışma; İstanbul Teknik Üniversitesi Güneş Arabası Ekibi'nin, Avustralya Kıtası'nda 2 yılda bir düzenlenen World Solar Challenge (WSC) Dünya Güneş Arabaları Yarışı için başlangıç sıralamasını belirleyecek pist etabında, aracın pist yarışı performansını arttırmak amacı ile hazırlanmış dinamik simülasyonu ile uzun yol yarış simülasyonunu içermektedir.

IPG/Carmaker yazılımı ile 3 tekerlekli (2 ön 1 arka) ve arka tekerleğinden tahrikli güneş arabasının teknik özellikleri ve güneş arabaları için özel üretilen düşük yuvarlanma direncine sahip lastikler tanımlanmıştır. Buna ek olarak, yarış pisti yazılım ortamında gerçek geometrisi ile oluşturulmuştur. Böylece aracın hangi dönemece ne hızla girmesi gerektiği, viraj dönme karakter ve kabiliyeti, pist boyunca araca etkiyen kuvvet, moment ve ivmeler gibi tüm önemli durum değişkenleri detaylı olarak izlenebilmiş, aracın pist yarışını maksimum ortalama hız ile minimum sürede bitirmesi için gerekli olan parametre etüdleri ve optimizasyonlar yapılmıştır. Diğer taraftan taşıta standart testler de uygulanarak davranışları incelenmiştir.

Bilindiği üzere "Güneş Arabası" aslen elektrikli bir taşıttır. Özelliği ise enerji kaynağı olarak fotovoltaik hücreler yardımı ile güneşten gelen ışık enerjisini kullanmasıdır. Bu nedenle çalışmada güneş gözesi modeli, akü (batarya) modeli, elektrik motoru modeli, tüm sistem için gerekli elektronik devrelerin modelleri, taşıtın doğrusal dinamik modeli, yol modeli ve yarış özelliklerinin bulunduğu model gibi birçok sistem modellenmiş, bu modeller ışığında farklı stratejiler üretilerek taşıtın parkuru maksimum ortalama hız ile minimum sürede bitirmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında tüm modellemeler için MATLAB/Simulink yazılım ortamı kullanılmıştır. Bu çalışma sayesinde, "yarış stratejisi" önceden oluşturulabilmekte, araç sanki yarıştaymış gibi sürülerek farklı hız referanslarının sonuçları değerlendirilebilmektedir. Diğer taraftan bu çalışma, aracın yarış süresince optimal kontrol algoritmaları ile otomatik olarak sürülmesine imkan verecek sistemin başlangıç parametrelerinin saptanmasında da önemli rol oynamaktadır.

SOLAR CAR RACE SIMULATION

SUMMARY

This study contains the dynamic simulation which was prepared to improve the performance during the qualifying lap of the solar car and the racing simulation prepared by Istanbul Technical University Solar Car Team for the World Solar Challenge (WSC) that is conducted every two years in Australia and contains a 3000km course.

3 wheeled (2 front 1 rear) rear wheel drive solar car and low-rolling resistance tires made specially for solar cars have been defined using the IPG/Carmaker software. In addition to that, the race track has been created with its real geometry within the software. Maximum entrance speed values for each curves, handling characteristics and capabilities and important parameters like moments, accelerations and forces applied to the car during the track has been observed and parameter research and optimizations to enable the car to lap the track as fast as possible have been conducted as a result. On the other hand, standard tests were applied to solar car to analyze vehicle behavior.

It is known that a "solar car" is an Electric Vehicle. Special about it is that it uses the solar energy with the help of electricity produced by photovoltaic cells. By that reason, systems like solar cell model, battery model, electric motor model, electonic circuitry model, vehicle linear dynamic model, road model, race specialties model are modeled and with the help of these models, different strategies are developed to be able to finish the course with the highest average speed and the minimum completion time. For creation of the models, MATLAB/Simulink software environment has been used. This study enabled the creation of a race strategy and evaluation of the outcomes of different speed referances beforehand. On the other hand, this study is also important to obtain the starting parameters that will be used at the system that drives the vehicle automaticly along the race using optimal control algorithms.

1. GİRİŞ

Fosil yakıtlar, hidrokarbon içeren kömür, petrol ve doğalgaz gibi doğal enerji kaynaklarıdır. Ölen canlı organizmaların oksijensiz ortamda milyonlarca yıl boyunca çözülmesi ile oluşmuşlardır. Endüstriyel alanda çok geniş bir kullanım alanı bulan fosil yakıtlar, bugünkü dünya enerji bütçesi içinde elektrik üretiminde de kullanılmaktadır.

20 ve 21. yüzyılda dünya çapındaki teknolojik gelişmelerle, fosil yakıtlardan elde edilen enerjiye olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Özellikle petrolden elde edilen akaryakıtlar, dünya çapında ve bölgesel olarak büyük çatışmaların ana sebebi haline gelmektedir. Dünya çapındaki bu enerji ihtiyacının artması ile çözüm arayışları, yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru yönelmiştir.

En genel olarak, yenilenebilir enerji kaynağı; enerji kaynağından alınan enerjiye eşit oranda veya kaynağın tükenme hızından daha çabuk bir şekilde kendini yenileyebilmesi ile tanımlanır. Örneğin, güneşten elde edilen enerji ile çalışan bir teknoloji bu enerjiyi tüketir, fakat tüketilen enerji toplam güneş enerjisinin yanında çok küçük kalır.

Rüzgâr enerjisi, su gücü, güneş enerjisi, jeotermal enerji, biyokütle, biyoyakıtlar (sıvı biyoyakıtlar, katı biyoyakıtlar, biyogaz) yenilenebilen enerji kaynaklarına örnektir.

Günümüzde kara ulaşımında yaygın olarak içten yanmalı motora sahip taşıtlar kullanılmaktadır. Bu taşıtların yaydıkları egzoz gazları doğal yaşama çok zarar vermektedir. Geçtiğimiz son on yıl içerisinde, otomobil üreticileri artık çevreye daha az zarar veren hatta zarar vermeyen araçların tasarımıyla daha çok ilgilenmeye başlamışlardır. Bu ilginin en önemli nedenlerinden biri kara taşıtları ile ilgili regülâsyonlar iken, diğeri ise fosil yakıt rezervlerinin azalması ve fiyatların günden güne artmasıdır.

Son yıllarda hem içten yanmalı motor, hem de elektrik motoruna sahip olan hibrit taşıtlar üretilmeye ve son kullanıcı tarafından yavaş yavaş benimsenmeye başlamıştır. Bu araçlar farklı tiplerde üretilebildiği gibi asıl amaçları şehir içinde düşük hızlarda yani içten yanmalı motorun veriminin düşük olduğu çalışma

şartlarında elektrik motorunu (destek veya yalnız başına ve aynı zamanda fren enerjisi geri kazanımında) kullanarak verimi arttırmak ve dolayısıyla yakıt tüketimini düşürmektir.

Henüz tamamen elektrik enerjisiyle çalışan taşıtlar günlük kullanım için tasarlanmamış olsalar da, yarışmalara katılmak amacıyla üniversiteler ve bazı firmalar tarafından güneş enerjili arabalar tasarlanıp üretilmektedir. ARIBA 5, İTÜ-GAE tarafından tasarlanan, tamamen güneş enerjisiyle çalışan bir elektrikli taşıttır. Bu tez çalışması kapsamında, tasarlanan taşıtın hem pist yarışı hem de uzun yol yarışı için hazırlanan simülasyonları anlatılacaktır.

2. ÇIKIŞ NOKTASI VE AMAÇ

1950'li yıllarda atılan güneş enerjisinin eldesine tohumlar ilk defa 1985 yılında kendine gövde bulmuş ve güneş arabaları tasarlanmaya başlanmıştır. Bunu izleyen yıllarda farklı coğrafyalarda bu çalışmaları özendirmek ve gelişmesini sağlamak amacı ile güneş arabaları yarışmaları düzenlenmeye başlanmıştır. Ülkemizde, 2005 yılında ilk kez TÜBİTAK tarafından düzenlenen yarışlar ile bu çabaya ortak olunmuştur. Genellikle üniversiteler bünyesinde devam eden çalışmalar sayesinde, teknolojik gelişmelerin izin verdiği ölçüde ilerlemeler kaydedilmiş, bu sayede de güneş arabaları günümüzün en verimli kara taşıtları olmuşlardır.

İstanbul Teknik Üniversitesi bünyesinde çalışmalarını 2004 yılından beri sürdüren İTÜ Güneş Arabası Ekibi, bugüne kadar 4 adet güneş arabası tasarlayıp üretmiş, şu an itibari ile beşincisi üzerine çalışmaktadır. Tasarladığı güneş arabası ile Avustralya kıtasında düzenlenen 3021 km uzunluğundaki World Solar Challenge (WSC) adlı yarışa tekrar katılmayı hedefleyen ekip, ilk katılımı olan 2009 yarışında edindiği tecrübeler ile eksikliklerini belirleyerek, bu eksiklikleri kapatma yoluna gitmiştir. Yarış boyunca güneş arabasının aküleri yarış kuralları gereği sadece ve sadece güneşten gelen enerji ile doldurulabilmektedir. 2009 yılının kendi klâsındaki birincisi yarışı ortalama 76km/h hız ile bitirmiştir. Bu da kaba bir hesapla güneşten yaklaşık 40 kWh civarında enerji aldığını göstermektedir. Yarış kurallarına göre her güneş arabasında yaklaşık 5kWh'lik bir akü grubu bulunmaktadır. Sonuç olarak bu güneş arabası 3021 km'lik bir yolu 45kWh enerji harcayarak tamamlamıştır. Benzinin alt ısıl değeri olan 11,86 kWh/lt değeri yoğunluğu ile çarpılırsa, bir litre benzinden 9,488 kWh enerji elde edilebildiği hesaplanır. Güneş arabasının yarış boyunca harcadığı enerji bu değere bölünür ise, güneş arabasının yaklaşık 5 litre benzine eşdeğer enerji ile 3021 km yol gittiği görülmektedir.

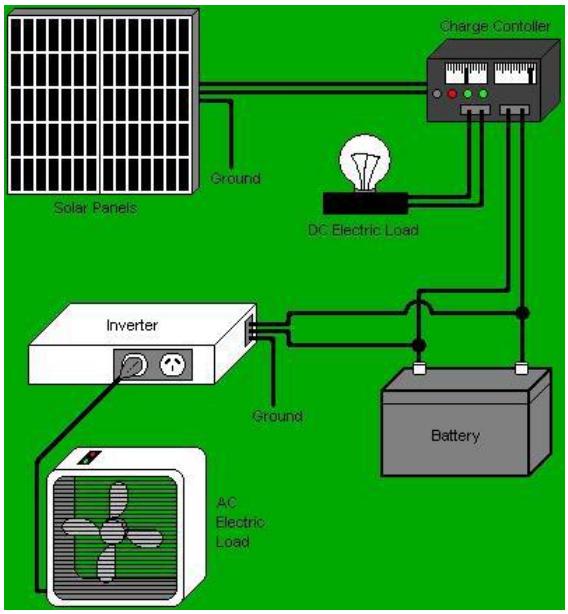
Bu kadar az enerji ile bu kadar uzun mesafe kat edebilmenin anahtarı verimlilik ve doğru yarış stratejisi oluşturmaktan geçmektedir. Yarışın her bir evresinde gidilmesi

gereken hız ya da aracın sürüş şeklinin önceden hesaplanabilmesi ve bunun yarış sırasında güncel durum göz önüne alınarak tekrar hesaplanabilmesi çok önemlidir. Bu tez kapsamında İTÜ Güneş Arabası Ekibi'nin 5 numaralı taşıtı ARIBA V'in yarış öncesi multidisipliner simülasyonu hazırlanmış, bu simülasyon kullanılarak farklı yarış stratejileri karşılaştırılmaya çalışılmış ve en doğru strateji seçilmiştir.

3. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMİ

Güneş pilleri, elektrik enerjisinin gerekli olduğu her uygulamada kullanılabilir. Güneş pili modülleri uygulamaya bağlı olarak, akümülatörler, eviriciler, akü şarj denetim aygıtları ve çeşitli elektronik destek devreleri ile birlikte kullanılarak bir güneş enerjisi sistemini oluştururlar. Bu sistemler, özellikle yerleşim yerlerinden uzak, elektrik şebekesi olmayan yörelerde, jeneratöre yakıt taşımanın zor ve pahalı olduğu durumlarda daha yaygın olarak kullanılırlar. Bunun dışında dizel jeneratörler ya da başka güç sistemleri ile birlikte karma olarak kullanılmaları da mümkündür.

Bu sistemlerde yeterli sayıda güneş pili modülü, enerji kaynağı olarak kullanılır. Güneşin yetersiz olduğu zamanlarda ya da özellikle gece süresince kullanılmak üzere genellikle sistemde akümülatör bulundurulur. Güneş pili modülleri gün boyunca elektrik enerjisi üreterek bunu akümülatörde depolar, yüke gerekli olan enerji akümülatörden alınır. Akünün aşırı şarj ve deşarj olarak zarar görmesini engellemek için kullanılan denetim birimi ise akünün durumuna göre, ya güneş pillerinden gelen akımı ya da yükün çektiği akımı keser. şebeke uyumlu alternatif akım elektriğinin gerekli olduğu uygulamalarda, sisteme bir evirici eklenerek akümülatördeki DC gerilim, 220 V, 50 Hz.lik sinüs dalgasına dönüştürülür. Benzer şekilde, uygulamanın şekline göre çeşitli destek elektronik devreler sisteme katılabilir. Güneş enerjisi sistemlerinde, güneş pillerinin maksimum güç noktasında çalışmasını sağlayan maksimum güç noktası izleyici cihazı bulunur. Şekil 3.1'de bir güneş enerjisi sisteminin blok şeması görülmektedir.



Şekil 3.1 Temel Güneş Enerjisi Sistemi

3.1 Tarihçe

Güneş pilleri, üzerlerine düşen ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren düzeneklerdir. Fotovoltaik etki ilk olarak Fransız bilim adamı Alexandre Edmond Becquerel tarafından 1839 yılında keşfedilmiştir. Sonrasında Willoughby Smith selenyum elementinde de fotovoltaik etki olduğunu 1873 yılında keşfetmiştir. 1876 yılında R. E. Day ve Willliam G. Adams selenyum ile platinyum arasındaki bir jonksiyonu aydınlattıklarında fotovoltaik etkinin oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Bu iki keşif 1877 yılında yapılan ilk selenyum güneş pilinin altyapısını hazırlamıştır. Fotovoltaik etki ile ilgili en kapsamlı teorik çalışmayı Albert Einstein yapmış, bu çalışması ile 1921' de Nobel Ödülünü almıştır. 1918 yılında, Polonyalı bilim adamı Jan Czochralski tek kristalli silikon üretmenin yolunu bularak, tek kristalli güneş pili üretimini mümkün kılmıştır. Böylece ilk silikon tek kristalli güneş pili 1941 yılında üretilmiştir. [1]

1955 yılında ilk kez %2 verimli bir güneş pili Hoffman Electronics-Semiconductor Division tarafından ticari olarak piyasaya sürülmüştür. İlk kez piyasaya sürülen bu gözenin maliyeti 25$/adet ve üretebileceği enerjinin maliyeti ise 1785$/W 'tır. Bundan sonraki çalışmalar sayesinde 1957 yılında verim %8'e çıkarılabilmiştir. [1]

Başta maliyetinin fazla olmasından dolayı güneş pilleri sadece laboratuar çalışmalarıyla sınırlı kalmış olsa da, teknolojik gelişmeler sonucunda verimleri artarak ticari bir değer kazanmışlardır. 1941 yılında üretilen ilk güneş pilinden bu

yana teknolojinin gelişmesi ile güneş pillerinin verimleri laboratuar ortamında %35lere kadar çıkartılmıştır. Bugün piyasada bulunabilen en verimli güneş gözeleri yaklaşık %33 verimlidirler.

3.2 Türkiye'de Güneş Enerjisi Potansiyeli

Ülkemiz, coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre şanslı durumdadır. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğünde (DMĠ) mevcut bulunan 1966-1982 yıllarında ölçülen güneşlenme süresi ve ışınım şiddeti verilerinden yararlanarak EĠE tarafından yapılan çalışmaya göre Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat (günlük toplam 7,2 saat), ortalama toplam ışınım şiddeti 1311 kWh/m²-yıl (günlük toplam 3,6 kWh/m²) olduğu tespit edilmiştir. Aylara göre Türkiye güneş enerji potansiyeli ve güneşlenme süresi değerleri ise Çizelge 3.1'de verilmiştir.[2]

Çizelge 3.1 Türkiye'nin Aylık Ortalama Güneş Enerjisi Potansiyeli

AYLAR	AYLIK TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ (Kcal/cm^2-ay)	(kWh/m^2-ay)	GÜNEŞLENME SÜRESİ (Saat/ay)
OCAK	4,45	51,75	103,0
ŞUBAT	5,44	63,27	115,0
MART	8,31	96,65	165,0
NİSAN	10,51	122,23	197,0
MAYIS	13,23	153,86	273,0
HAZİRAN	14,51	168,75	325,0
TEMMUZ	15,08	175,38	365,0
AĞUSTOS	13,62	158,40	343,0
EYLÜL	10,60	123,28	280,0
EKİM	7,73	89,90	214,0
KASIM	5,23	60,82	157,0
ARALIK	4,03	46,87	103,0
TOPLAM	112,74	1311	2640
ORTALAMA	**308,0 cal/cm^2-gün**	**3,6 kWh/m^2-gün**	**7,2 saat/gün**

Türkiye'nin en fazla güneş enerjisi alan bölgesi Güney Doğu Anadolu Bölgesi olup, bunu Akdeniz Bölgesi izlemektedir. Güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi değerlerinin bölgelere göre dağılımı da Çizelge 3.2' de verilmiştir.

Ancak, bu değerlerin, Türkiye'nin gerçek potansiyelinden daha az olduğu, daha sonra yapılan çalışmalar ile anlaşılmıştır. Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) ve Devlet Meteoroloji İşleri (DMİ), güneş enerjisi değerlerinin daha sağlıklı olarak ölçülmesi amacıyla enerji amaçlı güneş enerjisi ölçümleri almaktadırlar. Devam etmekte olan

ölçüm çalışmalarının sonucunda, Türkiye güneş enerjisi potansiyelinin eski değerlerden %20-25 daha fazla çıkması beklenmektedir.[2]

Çizelge 3.2 Türkiye'nin Yıllık Toplam Güneş Enerjisi Potansiyelinin Bölgelere Göre Dağılımı

BÖLGE	TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ (kWh/m^2-yıl)	GÜNEŞLENME SÜRESİ (Saat/yıl)
G.DOĞU ANADOLU	1460	2993
AKDENİZ	1390	2956
DOĞU ANADOLU	1365	2664
İÇ ANADOLU	1314	2628
EGE	1304	2738
MARMARA	1168	2409
KARADENİZ	1120	1971

3.3 Güneş Enerji Sisteminin Temel Yapısı

Bir güneş enerji sistemi birçok yapının bir araya gelmesi neticesinde oluşmaktadır. Bütün bu komponentlerin verimleri toplam sistemin verimini etkilemektedir. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etmemizi sağlayan güneş pillerinin verimleri de çok yüksek olmadığından, diğer parçaların verimlerinin olabildiğince yüksek olması istenir. Böylece sistemin verimi maksimize edilmiş olunur.

Bir güneş enerji sistemini oluşturan parçalar aşağıda sıralanmıştır.

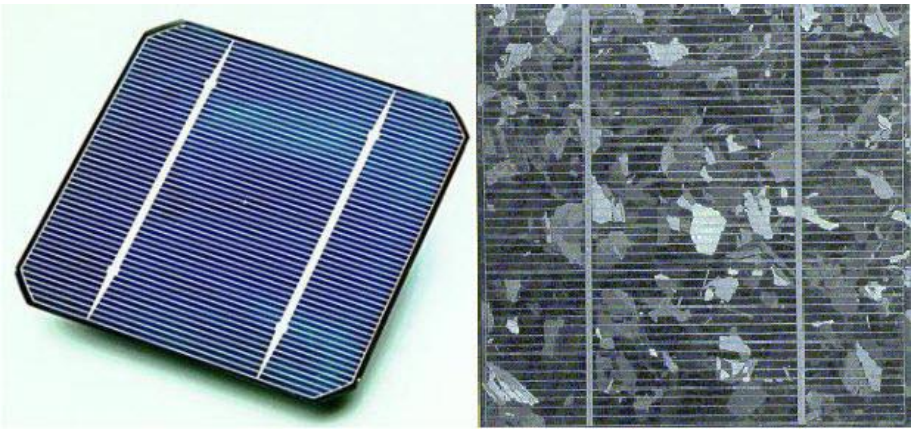
- ✓ Güneş Paneli
- ✓ Maksimum Güç Noktası Takip Edicisi
- ✓ Akümülatör
- ✓ Doğru Akım Çeviricisi
- ✓ Evirici
- ✓ Kontrol Devresi
- ✓ Koruma Devresi

3.4 Güneş Pilleri

3.4.1 Yapısal Özellikleri

Güneş pilleri, yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken maddelerdir. Yüzeyleri kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilen güneş pillerinin alanları genellikle 100 cm^2 civarında, kalınlıkları ise 0,2-0,4 mm arasındadır. Güneş pilleri fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışırlar, yani üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. Pilin verdiği elektrik

enerjisinin kaynağı, yüzeyine gelen güneş enerjisidir. Güneş enerjisi, güneş pilinin yapısına bağlı olarak % 5 ile % 33 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilir. Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda güneş pili birbirine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir, bu yapıya güneş pili modülü ya da fotovoltaik modül adı verilir. Güç talebine bağlı olarak modüller birbirlerine seri ya da paralel bağlanarak bir kaç Watt'tan Mega Watt'lara kadar bir sistem oluşturulur.



Şekil 3.2 Güneş Gözeleri



Şekil 3.3 Güneş Paneli

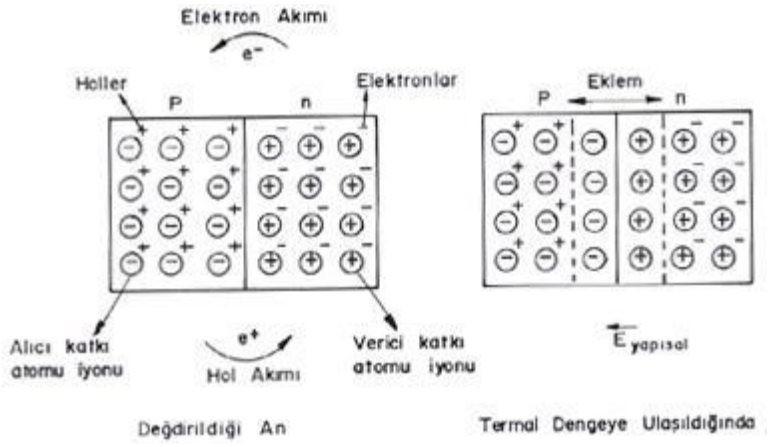
Güneş pilleri yarı iletken malzemeden yapılırlar. Güneş pillerinde kullanılabilinecek en elverişli yarı iletken malzemelere silisyum, galyum arsenik, kadmiyum tellür gibi malzemeler örnek verilebilir.

Yarı-iletken maddelerin güneş pili olarak kullanılabilmeleri için n ya da p tipi katkılanmaları gereklidir. Katkılama, saf yarıiletken eriyik içerisine istenilen katkı maddelerinin kontrollü olarak eklenmesiyle yapılır. Elde edilen yarı-iletkenin n ya da p tipi olması katkı maddesine bağlıdır. En yaygın güneş pili maddesi olarak kullanılan silisyumdan n tipi silisyum elde etmek için silisyum eriyiğine periyodik cetvelin 5. grubundan bir element, örneğin fosfor eklenir. Silisyum'un dış yörüngesinde 4, fosforun dış yörüngesinde 5 elektron olduğu için, fosforun fazla olan

tek elektronu kristal yapıya bir elektron verir. Bu nedenle V. grup elementlerine "verici" ya da "n tipi" katkı maddesi denir.

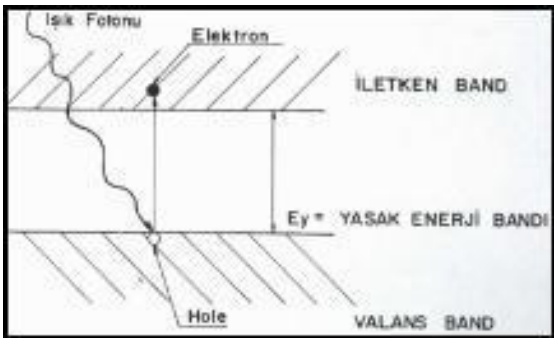
P tipi silisyum elde etmek için ise, eriyiğe 3. gruptan bir element (alüminyum, indiyum, bor gibi) eklenir. Bu elementlerin son yörüngesinde 3 elektron olduğu için kristalde bir elektron eksikliği oluşur, bu elektron yokluğuna hol ya da boşluk denir ve pozitif yük taşıdığı varsayılır. Bu tür maddelere de "p tipi" ya da "alıcı" katkı maddeleri denir.

P ve N tipi katkılandırılmış malzemeler bir araya getirildiğinde yarıiletken eklemler oluşturulur. N tipi yarıiletkende elektronlar, p tipi yarıiletkende holler çoğunluk taşıyıcısıdır. P ve N tipi yarıiletkenler bir araya gelmeden önce, her iki madde de elektriksel bakımdan nötrdür. Yani P tipinde negatif enerji seviyeleri ile hol sayıları eşit, n tipinde pozitif enerji seviyeleri ile elektron sayıları eşittir. PN eklem oluştuğunda, N tipindeki çoğunluk taşıyıcısı olan elektronlar, P tipine doğru akım oluştururlar. Bu olay her iki tarafta da yük dengesi oluşana kadar devam eder. PN tipi maddenin ara yüzeyinde, yani eklem bölgesinde, P bölgesi tarafında negatif, N bölgesi tarafında pozitif yük birikir. Bu eklem bölgesine "geçiş bölgesi" ya da "yükten arındırılmış bölge" denir. Bu bölgede oluşan elektrik alan "yapısal elektrik alan (Ey)" olarak adlandırılır. Aşağıda PN eklemin oluşması şematize edilmiştir.



Şekil 3.4 PN Eklemin Oluşması

Yarıiletken eklemin güneş pili olarak çalışması için eklem bölgesinde fotovoltaik dönüşümün sağlanması gerekir. Bu dönüşüm iki aşamada olur, ilk olarak, eklem bölgesine ışık düşürülerek elektron-hol çiftleri oluşturulur, ikinci olarak ise, bunlar bölgedeki elektrik alan yardımıyla birbirlerinden ayrılır.



Şekil 3.5 Güneş Gözesi Çalışma İlkesi

Yarıiletkenler, bir yasak enerji aralığı tarafından ayrılan iki enerji bandından oluşur. Bu bantlar valans bandı ve iletkenlik bandı adını alırlar. Bu yasak enerji aralığına eşit veya daha büyük enerjili bir foton, yarıiletken tarafından soğurulduğu zaman, enerjisini valans bandındaki bir elektrona vererek, elektronun iletkenlik bandına çıkmasını sağlar. Böylece, elektron-hol çifti oluşur. Bu olay, PN eklem güneş pilinin ara yüzeyinde meydana gelmiş ise elektron-hol çiftleri buradaki elektrik alan tarafından birbirlerinden ayrılır. Bu şekilde güneş pili, elektronları n bölgesine, holleri de p bölgesine iten bir pompa gibi çalışır. Birbirlerinden ayrılan elektron-hol çiftleri, güneş pilinin uçlarında yararlı bir güç çıkışı oluştururlar. Bu süreç yeniden bir fotonun pil yüzeyine çarpmasıyla aynı şekilde devam eder. Yarıiletkenin iç kısımlarında da, gelen fotonlar tarafından elektron-hol çiftleri oluşturulmaktadır. Fakat gerekli elektrik alan olmadığı için tekrar birleşerek kaybolmaktadırlar.

3.4.2 Çeşitleri

Güneş pilleri yapısında kullanılan malzemelere göre çeşitlilik göstermektedir. Bir göze üretildiği malzemeye göre değişik verimlerde çalışmakta, bu da hem sistem verimliliği hem de maliyet olarak uygulamaya yansımaktadır. Güneş pilleri pek çok farklı maddeden yararlanarak üretilebilir. Günümüzde en çok kullanılan maddeler şunlardır:

- **Kristal Silisyum:** Önce büyütülüp daha sonra 200 mikron kalınlıkta ince tabakalar halinde dilimlenen Tek kristal Silisyum bloklardan üretilen güneş pillerinde laboratuar şartlarında %24, ticari modüllerde ise %15'in üzerinde verim elde edilmektedir. Dökme silisyum bloklardan dilimlenerek elde edilen çok kristal Silisyum güneş pilleri ise daha ucuza üretilmekte, ancak verim de daha düşük olmaktadır. Verim, laboratuar şartlarında %18, ticari modüllerde ise %14 civarındadır.

- **Galyum Arsenit (GaAs):** Bu malzemeyle laboratuar şartlarında %25 ve %33 (optik yoğunlaştırıcılı) verim elde edilmektedir. Diğer yarıiletkenlerle birlikte oluşturulan çok eklemli GaAs pillerde %30 verim elde edilmiştir. GaAs güneş pilleri uzay uygulamalarında ve optik yoğunlaştırıcılı sistemlerde kullanılmaktadır.
- **Amorf Silisyum:** Kristal yapı özelliği göstermeyen bu Si pillerden elde edilen verim %10 dolayında, ticari modüllerde ise %5-7 mertebesindedir. Günümüzde daha çok küçük elektronik cihazların güç kaynağı olarak kullanılan amorf silisyum güneş pilinin bir başka önemli uygulama sahasının, binalara entegre yarısaydam cam yüzeyler olarak, bina dış koruyucusu ve enerji üreteci olarak kullanılabileceği tahmin edilmektedir.
- **Kadmiyum Tellürid (CdTe):** Çok kristal yapıda bir malzeme olan CdTe ile güneş pili maliyetinin çok aşağılara çekileceği tahmin edilmektedir. Laboratuar tipi küçük hücrelerde %16, ticari tip modüllerde ise %7 civarında verim elde edilmektedir.
- **Bakır İndiyum Diselenid (CuInSe2):** Bu çok kristal pilde laboratuar şartlarında %17,7 ve enerji üretimi amaçlı geliştirilmiş olan prototip bir modülde ise %10,2 verim elde edilmiştir.
- **Optik Yoğunlaştırıcılı Hücreler:** Gelen ışığı 10-500 kat oranlarda yoğunlaştıran mercekli veya yansıtıcılı araçlarla modül verimi %17'nin, pil verimi ise %30'un üzerine çıkılabilmektedir. Yoğunlaştırıcılar basit ve ucuz plastik malzemeden yapılmaktadır.

Ticari ortama girmiş olan geleneksel Si güneş pillerinin yerini alabilecek verimleri aynı ama üretim teknolojileri daha kolay ve daha ucuz olan güneş pilleri üzerinde de son yıllarda çalışmalar yoğunlaştırılmıştır. Bunlar; fotoelektrokimyasal çok kristalli Titanyum Dioksit piller, polimer yapılı Plastik piller ve güneş spektrumunun çeşitli dalga boylarına uyum sağlayacak şekilde üretilebilen enerji bant aralığına sahip Kuantum güneş pilleri gibi yeni teknolojilerdir.

3.4.3 Kayıpları

Güneş pilleri kayıplar nedeni ile daha düşük verimle çalışmaktadır. Güneş pillerinde ilk çalışma anından başlayarak görülen kayıplar aşağıdaki gibidir.

- **Işıksal Kayıplar:** Güneş ışığı fotonlarının soğurulmaması ve azınlık

taşıyıcılarının üretilememesinden doğan kayıplar,

- **Elektriksel Kayıplar:** Fotovoltaik diyotların optimum elektrik parametrelerini düşüren kayıplar,
- **Ara Yüzey Kayıpları:** Beş tabakanın her biri için hacim kayıplarına ek olarak ortaya çıkan kayıplar olarak sınıflandırabiliriz

3.4.3.1 Işıksal kayıplar

Güneş pillerinde üretilen akım değeri, üretilen azınlık taşıyıcıları ve soğurulan güneş ışığı fotonlarının sayısı ile belirlenir. Işıksal kayıplar (JL) değerinde azalmalara yol açar. Bu kayıplar, her tabakada gerçekleşen yansıma kayıpları ile tabakalar veya ara yüzeylerde görülen dış soğurulma kayıpları olarak iki kısımda incelenebilir.

3.4.3.2 Elektriksel kayıplar

Elektrik kayıplarını tanımlamanın en kolay yolu akım-gerilim karakteristiğini kullanmaktır. Bu kayıplar akım gerilim kayıplarından oluşur. Toplanıp çoğunluk taşıyıcılarına çevrilemeyen azınlık taşıyıcıları, akım kayıplarını belirler. Gerilim kayıpları, açık devre geriliminin beklenen değerinin altına bir düşüş olarak tanımlanır. Seri ve paralel direnç kayıpları ile zayıf diyot karakteristikleri, elde edilecek akım gerilim değerlerini küçültecektir.

a) Akım kayıpları

Güneş pillerinde üretilen azınlık taşıyıcılarının kaybı pek çok yolla gerçekleşebilir. Hacim içinde yeniden birleşme kayıpları, uyarılan taşıyıcıların sonlu ömürlerinden kaynaklanır. Bu nedenle ortaya çıkan akım kaybı, yayınım uzaklıklarıyla soğurucu kalınlığı arasındaki orana bağlıdır. Soğurucu kalınlığının aynı zamanda soğurmayı en iyi hale getirmek üzere seçilmesi gerektiğinden, ışıksal ve elektriksel gereksinimler arasında bir uzlaşma sağlanmalıdır. İyi tasarlamış güneş pillerinde hacim içi yeniden birleşme kayıpları %5 ile %20 arasında değişir. Yüzey yeniden birleşmesi, bir malzemedeki her kesitinin yeni elektronik koşullar yaratmasından kaynaklanmaktadır. Işınımla üretilen ve yüzeye doğru yayınıma uğrayan taşıyıcılar, yüzey etkilerini önleyici özel önlemler alınmadığı ya da taşıyıcıların yüzeye ulaşmaları engellendiği zaman, yüzeyde yitirilirler. Yüzeyde bir oksit tabakanın oluşturulması, genellikle, yüzey koşullarının etkisini ve bundan dolayı da taşıyıcı kaybını azaltır. Yüzey yakınlarına uygulanan homojen olmayan bir katıştırma işlemi, bir iç elektrik alanı oluşumuna yol açarak, azınlık taşıyıcıların yüzeyden

uzaklaştırılmasına ve akım kayıplarının azaltılmasına neden olur. Yüzeydeki bu yeniden birleşme kaybı en iyileştirilmiş güneş pillerinde %0-5 arasında değişim gösterir. Kristal sınırları iç yüzeyler gibi davranabildiğinden, serbest bir yüzey ölçüsünde azınlık taşıyıcı kaybına neden olabilirler. Kristal sınırlarında pürüzler çok daha etkin olduğundan yapılacak bir katıştırma işlemi azınlık taşıyıcılarını uzaklaştıracak ve akım kayıplarını önlemede başarılı olacaktır. [3]

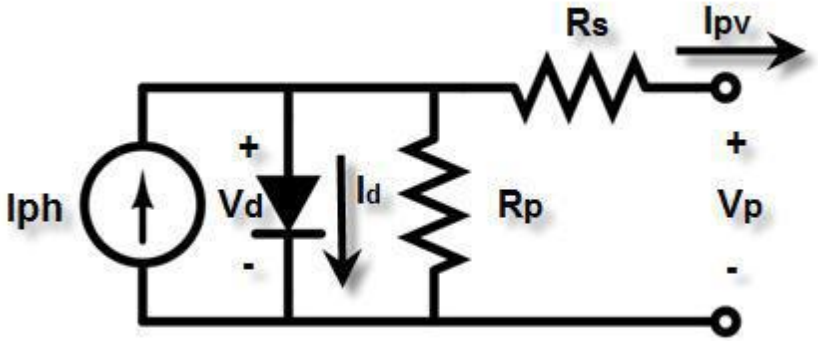
b) Açık Devre Gerilimi Kayıpları

Homojen eklemler, heterojen eklemler ve Schottky açık devre gerilimi ya hacim içi yeniden birleşme ömrü, ya da ara yüzey yeniden birleşme hızları ile denetlenir. Açık devre gerilimini kontrol eden ve etkileyen ek parametreler bant aralığı ve eklemin n ve p taraflarının katıştırılma seviyeleridir. Açık devre gerilim kayıpları %4 ile %50 arasında değişir.

c) Direnç Kayıpları

Seri direnç ve paralel iletkenlik güneş pillerinde arzu edilmeyen özelliklerdir. Paralel direnç değeri açık -devre gerilimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. İdeal bir güneş pilinde paralel direnç sonsuza yakın olmalıdır. Bakır Sülfit/Kadmiyum Sülfit güneş pillerinde alın ızgara, Kadmiyum Sülfit tabakasına kısmi kontak yaparak paralel bir iletkenlik oluşturur. Güneş pillerinde paralel iletkenlik ve seri direnç kayıpları %0-10 mertebesindedir.

3.4.4 Elektriksel Eşdeğer Devresi



Şekil 3.6 Güneş Gözesinin Elektriksel Eşdeğer Devresi

Şekil 3.6'da bir güneş pilinin elektriksel eşdeğer devresi gözükmektedir. Bu devrede güneş ışınımı gerilim kontrollü akım kaynağı ile modellenmiştir. Güneş gözesi üzerine düşen ışığın miktarı arttıkça üretilen elektrik akımı da artmaktadır. Güneş hücresinin gövdesi yarı iletken malzeme olduğundan dolayı diyotla modellenmiştir. Devrede görülen R_s direnci seri direnç olarak adlandırılmakta ve gözenin meydana

geldiği yarıiletken malzemenin direnci ile gözelerin birbirleriyle bağlantıları sırasında oluşan direnci temsil etmektedir. R_p direnci ise paralel direnç olarak adlandırılmakta ve çok ince katmanlardan oluşmuş olan film yapısına sahip malzemelerin sahip olduğu dirençlerin toplamı olarak alınmaktadır. Bir karşılaştırma yapıldığında seri direnç, paralel direncin yanında çok küçük bir değere sahip olduğu için ihmal edilebilmektedir. Paralel direnç devrenin asıl direnci olarak kabul edilmektedir [5].

Şekil3. 6'da görülen devre için çıkış akımı I_{pv} denklem 1'deki gibi hesaplanır. Burada gerilimin değeri sıfıra eşit alınırsa kısa devre akımı elde edilir.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \left(e^{\frac{q(V+IRs)}{kT}} - 1 \right) \quad (3.1)$$

Güneş pilinin elektriksel eşdeğer devresinde kullanılan kısaltmalar aşağıda açıklanmıştır.

I_{ph}: Güneş ışığı tarafından üretilen elektrik akımı

I_d: Geri dönüş akımı

I_{pv}: Yük akımı

V_p: Güneş pili gerilimi

I_{sc}: Kısa devre akımı

T: Güneş pilinin çalışma sıcaklığı

k: Boltzman sabiti

q: Elektrik yükü

R_s: Seri direnç

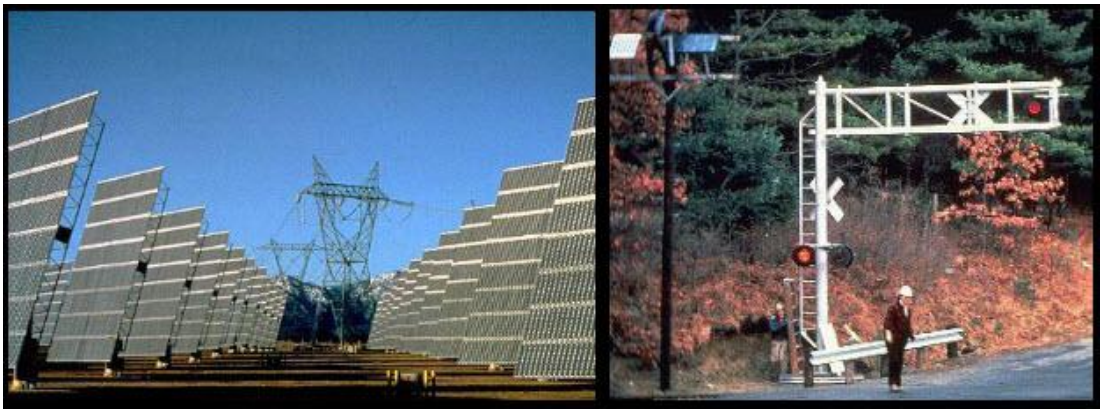
3.4.5 Uygulama Alanları

Tüm bu anlatılanlar ışığında güneş enerjisi çok çeşitli uygulamalarda karşımıza çıkmaktadır. Özellikle kentten uzak bölgelerde çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Yerleşim birimlerinden uzak, halk arasındaki tabirle "dağ başındaki" bir evin elektrik ihtiyacının karşılanması, telekomünikasyon vericilerinin ihtiyacı olan enerjinin karşılanması, yollardaki sinyalizasyonlar buna örnek olarak verilebilir. Bunun dışında bahçe ve park aydınlatmaları, gökdelenlerde gerekli olan enerjinin fotovoltaik kaplamalarla karşılanması, uydular, genel olarak elektrik üretimi yapan güneş enerjisi santralleri, güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmesinin örneklerindendir. Günümüzde gelişimi süren bu enerji kaynağının daha verimli hale

getirilmesi ve teşvik edilmesi adına özellikle üniversiteler bünyesinde yapılan birçok çalışma vardır. Bunlara güneş enerjisi ile çalışan araba, güneş enerjisiyle çalışan tekne ve güneş enerjisiyle çalışan uçaklar örnek verilebilir. Aşağıda güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde edilen değişik uygulama örnekleri verilmiştir.



Şekil 3.7 Evlerde ve Uydularda Güneş Pili Kullanımı



Şekil 3.8 Güneş Enerjili elektrik Santrali ve Sinyalizasyon

3.5 Güneş Enerjisi Kullanımının Faydaları

Elektrik üretimi için pek çok yöntem olmasına karşılık, güneş pilleri ile elektrik üretiminin bazı yararları vardır [4]. Bunlar aşağıda kısaca açıklanmıştır.

- ✓ Mevcut sistemlerden farklı olarak en büyük yararı, herhangi bir fosil yakıt veya bağlantı gerektirmeden bağımsız olarak elektrik üretilebilmesidir.
- ✓ Kullanılan yakıtı, her yerde ve bedava bulmak mümkündür. Taşıma ve (devre içindeki yerel bataryalar hariç) depolama gibi sorunlar yoktur.
- ✓ Sistemde kullanılan hareketli parçalar çok az olduğundan çok az bakım gerektirirler. Elektrik üretiminde kullanılan diğer sistemler (jeneratörler,

rüzgar veya hidro-elektrik türbinleri vs.) düzenli olarak bakıma gerek duyarlar. Eğer, güneş enerjisi sistemi kompleks ise, bir miktar bakım gerekebilir; ancak, genel olarak, bu sistemler için bakımsız (maintenance-free) demek yanlış olmayacaktır.

- ✓ Diğer elektrik üretim sistemleriyle karşılaştırıldıklarında, belki de en büyük yararları güvenilir olmalarıdır. Hareketli parçaları ya çok azdır; ya da yoktur. Şimşekler, güçlü rüzgarlar veya kum fırtınaları, nem ve ısı, kar veya buz gibi doğa olaylarına dayanıklıdırlar.

- ✓ Enerji kullanılmak istenen yerde üretilebilir. Böylece enerjiyi taşımak gerekmez. Şebekenin ulaşmadığı, örneğin, GSM vericilerinin yerleştirildiği yerlerde, bu sistemi kullanmak olasıdır.

- ✓ Enerji kaynağı ile kullanım yeri arasında, uzun kablolar ve bağlantı elemanları olmadığından arada oluşabilecek güç kaybından kaçınılmış olur. Bu sistemle, çok sayıda tüketim noktası beslenmek istendiği zaman bile yerel kayıplar yok denecek kadar azdır.

- ✓ Modüler bir sistem olduğu için güç çıkışı kolaylıkla arttırılabilir. Mevcut modüllere yenilerinin eklenmesi ile sistem, artan güç gereksinimini karşılayabilecek duruma getirilebilir.

- ✓ Üretilen enerji şebekeye geri beslenebilir. Böylece enerjinin güneş enerjisi tesisinin bulunduğu yerdeki tüketeçlerin az kullandığı ya da kullanmadığı saatlerde, enerji şebekeye geri beslenerek, mali Çizelge ve çevresel kirlilik bakımından durum iyileştirilebilir.

4. GÜNEŞ ARABASI

4.1 Güneş Arabası Nedir?

Güneş arabası temel olarak güneşten aldığı enerji ile hareket eden bir elektrikli taşıttır. Bu enerji genellikle aracın üst yüzeyine monte edilmiş güneş panellerinden elde edilir. Güneş Gözeleri güneş ışığını direkt olarak elektrik enerjisine çevirirler. Güneş arabaları (taşıtları, araçları) pratik olarak günlük taşıma aracı olarak günümüzde satılmamakta ama gelecekte alacağı büyük rol açısından özellikle üniversiteler tarafından desteklenen mühendislik çalışmalarının bir ürünüdürler. Diğer yandan güneş enerjisi ile şarj edilen araçlar yaygınlaşmakta ve güneş enerjili botlar da ticari bir ürün olarak günümüzde karşımıza çıkmaktadır. [6]

Güneş arabaları uçak-uzay, bisiklet, elektronik, alternatif enerji ve otomotiv endüstrilerinin kombinasyonundan oluşmaktadır. Güneş arabaları genellikle güneş arabası yarışları için tasarlanmaktadır. Bu nedenle araç tasarımı kurallarla sınırlandırılmaktadır. Güneş arabası tasarımında 5 önemli nokta bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla;

- İyi Aerodinamik
- Düşük yuvarlanma dirençli lastikler
- Hafif yapı özellikleri içeren konstrüktif öğeler
- Yüksek verimli elektriksel sistem
- Maksimum güneş enerjisi

olarak sıralanabilir. Araç tasarımı yukarıda verilen 5 önemli nokta etrafında kurallar çerçevesinde şekillenmektedir. Bu süreç uzun optimizasyonlar isteyen, sonuca ulaşmanın pek de kolay olmadığı uzun bir araştırma-geliştirme sürecidir.

Güneş arabalarında da normal araçlardaki gibi bir sürücü paneli ve bu panelde bazı göstergeler vardır. Aracın istenilen şekilde gitmesi için sürücü bu göstergeleri sürekli kontrol etmektedir. Kablosuz telemetri sistemine sahip araçlarda ise, güneş arabası takımı araçla ilgili birçok ölçüme uzaktan erişim ile ulaşabilmekte ve buna göre sürücüyü bilgilendirip kumanda edebilmektedirler. Daha gelişmiş güneş

arabalarında ise kablosuz telemetri sistemi ile araç otomatik kontrol sistemleri sayesinde yürütülmekte, sürücü sadece direksiyon kontrolünü elinde bulundurmaktadır.



Şekil 4.1 İTÜ Güneş Arabası Ekibi'nin 4 Numaralı Aracı: ARIBA IV

Aşağıdaki Çizelge Honda Dream ile bir 4 çeker aracın karşılaştırmasını içermektedir.[7]

Çizelge 4.1 Güneş Arabası ile 4 Çeker Araç Karşılaştırması [7]

	Güneş Arabası	**4WD**
Ağırlık [Kg]	167	2400
Maksimum Güç [kW]	6	160
Boyut [m]	6 x 2 x 1.1	4.8 x 1.9 x 1.9
Yolcu Sayısı	2	Bir ailenin sığabileceği kadar büyük olmasına rağmen genelde 1 yada 2 kişi
80km/h hızla gidebilmesi için gereken güç [kW]	1	~18
Darwin - Adelaide arası yakıt masrafı [$]	0	430 $

Ülkemizde güneş arabası çalışmalarının lokomotifi olan İstanbul Teknik Üniversitesi Güneş Arabası Ekibi (İTÜ-GAE), bugüne kadar 4 adet güneş arabası tasarlayıp üretmiştir. Tasarladığı araçlarla ulusal yarışlarda 3 sene üst üste 1. ve 2. sıraları elde ederek (duble yaparak) 15 kupa kazanan ekip, 2009 yılında Avustralya kıtasında düzenlenen World Solar Challenge ’09 yarışına katılarak ülkemizi uluslar arası platformda temsil eden ilk güneş arabası takımı olmuştur. Katıldığı WSC’09’dan “Best Newcomer” ödülüyle dönen İTÜ-GAE uluslar arası alanda ödül alan ilk ve tek Türk Güneş Arabası Ekibi olarak bu alandaki iddiasını ortaya koymuştur. Aşağıda

İTÜ-GAE'nin World Solar Challenge '11 yarışı için tasarladığı aracın teknik bilgileri bulunmaktadır.

Çizelge 4.2 İTÜ Güneş Arabası Ekibi'nin 5 Numaralı Aracı ARIBA V'in Teknik Özellikleri [8]

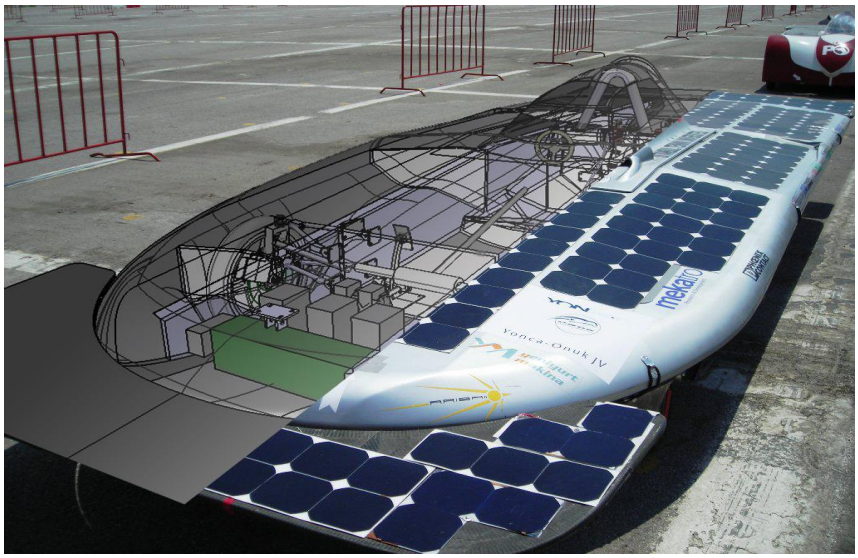
	ARIBA V
Üretim Yılı:	2011
Araç Ağırlığı:	162kg
Max Hız:	120km/h
Güneşsiz Azami Menzil (eğimsiz yolda):	350km
Uzunluk:	5000 mm
Genişlik:	1800 mm
Yükseklik:	1100 mm
İz açıklığı:	1550 mm
Dingil Mesafesi:	2200 mm
Ağırlık Dağılımı:	%60 ön, %40 arka
Şasi:	Karbonfiber
Kabuk:	Karbonfiber
Ön süspansiyon:	Çift A Kolu
Arka Süspansiyon:	Trailing arm
Direksiyon:	Özel Yarış Tipi Hafif Tasarım
Fren Sistemi:	Hidrolik
Tekerlek Sayısı:	3
Tekerlek Dizilimi:	2 ön, 1 arka (arka aks tahrikli)
Jant:	Alüminyum
Jant Çapı (ön ve arka aks):	16"

Çizelge 4.3 İTÜ Güneş Arabası Ekibi'nin 5 Numaralı Aracı ARIBA V'in Elektriksel Özellikleri [8]

	ARIBA V
Motor Çeşidi:	Fırçasız Doğru Akım Motoru, CSIro
Motor Gücü (Nominal):	1.8kW
Motor İşletme Gerilimi:	96V
Motor Verimi:	97.4%
Motor Ağırlığı:	12Kg
Motor Tahrik Sistemi:	Geliştirilmiş Doğrudan tahrik
Motor Sürücü	Tritium
Akü Tipi:	Li-Po
Akü Gerilimi:	104.5V
Akü Kapasitesi:	5 kWh
Akü Ağırlığı:	22Kg
Güneş Pilleri:	Sun Power A300
Güneş Pilleri Verimi:	22.70%
Panel Gücü:	1350W
Güneş Pilleri Adedi:	402
Güneş Pilleri Tipi:	Silikon - Mono Kristal
Toplam Göze Alanı:	6,28 m²
Aktif Göze Alanı:	6 m²
Güneş Pili Laminasyonu:	Gochermann
Mppt:	Drivetek
Mppt Adedi:	3
Yumuşak Kalkış	Var
Otomatik hızlanma ve Kontrol Algoritmaları	Var
Ölçüm Devresi:	İ.T.Ü. Tasarım 2010
Araç İçi İletişim:	RF ile Ölçüm Devresi, MPPT, Kontrol Paneli, LCD, Sıcaklık Devresi, Motor Sürücü
Pit Ekibi İle İletişim:	Zigbee tabanlı RF Modem
Koruma:	İ.T.Ü. Tasarım 2010 Ölçüm Devresi Kontrolünde Otomatik Kontaktörler ve Otomatik Sigorta
Koruma Koşulları:	Aşırı Akım, Aşırı Gerilim, Düşük Gerilim, Aşırı Sıcaklık



Şekil 4.2 ARIBA V



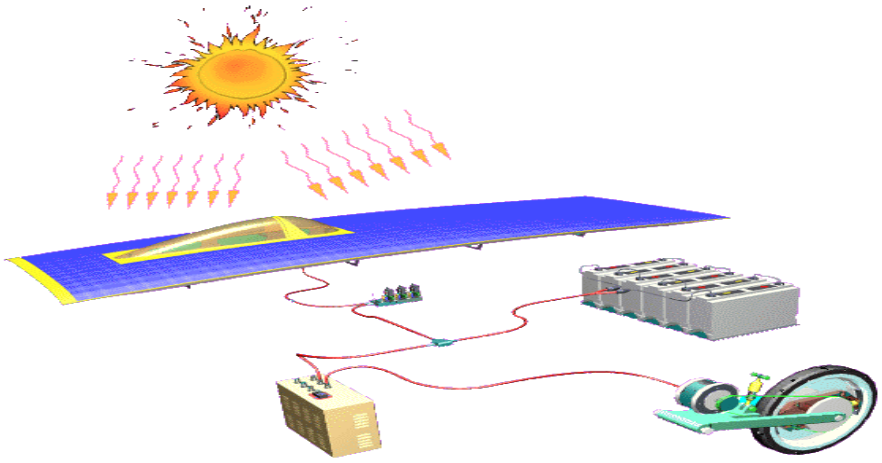
Şekil 4.3 İTÜ Güneş Arabası Ekibi'nin 2 Numaralı Aracı ARIBA 2 & 3 Boyutlu Çizimi

4.2 Güneş Arabası Nasıl Çalışır?

Güneş arabası birden çok komponentin bir araya gelmesi ile oluşmaktadır. Bir güneş arabasının tahrik sistemini oluşturan parçalar aşağıda sıralanmıştır.

- Güneş Panelleri
- Maksimum Güç Noktası Takipçisi (MPPT)
- Motor
- Motor Sürücü
- Akü
- Elektronik Devreler

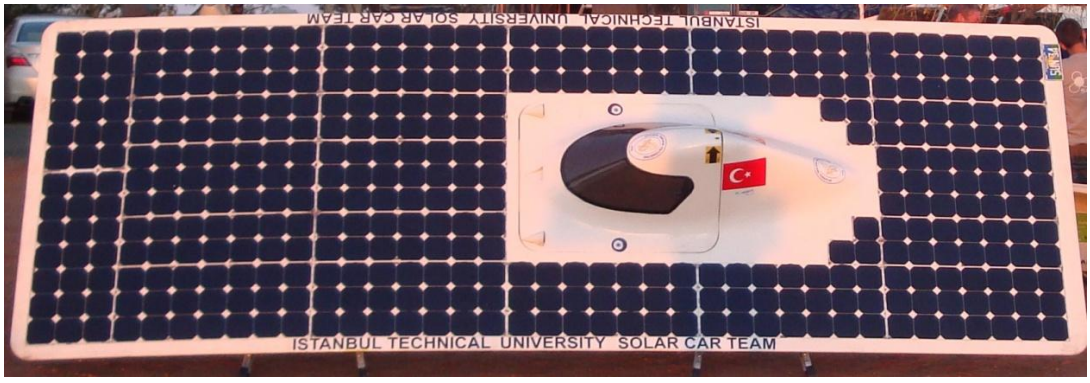
Güneş arabasının temel parçaları şekil 4.4'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Bir Güneş Arabasının Temel Tahrik Elemanlarının Şematik Gösterimi

4.2.1 Güneş Panelleri

Güneş arabalarının enerji ihtiyacını karşılayan, aracın en önemli elemanıdır. Güneş panelleri yarış kurallarına göre farklı türlerde ve farklı adetlerde kullanılabilirler. Silikon güneş panelleri kullanan araçlar bugünkü yarış kuralları gereği yaklaşık 400 adet (genellikle 125mm x 125mm boyutlarında) güneş gözesini üst kabuğunda barındırmaktadır. Daha yüksek teknolojili gözeler kullanılan araçlarda ise, birim hücre alanı küçüldüğü için sayı binleri bulmaktadır. Araçta kullanılan her bir güneş gözesi, güneş ışığını elektrik enerjisine çevirmektedir. Günümüz teknolojisinde silikon türdeki güneş gözeleri laminasyonları ile birlikte %24, GaAs güneş gözeleri ise laminasyonları ile beraber %34 verimlerde elektrik enerjisi üretilebilmektedirler.
İstanbul Teknik Üniversitesi Güneş Arabası Ekibi, World Solar Challenge 2011 yarışı için hazırladığı aracında silikon tipte güneş gözeleri kullanmayı tercih etmiştir. Kullanılacak güneş gözelerinin verimi %24, her bir hücrenin nominal çıkış gücü 3,35W'tır. Yarış kuralları gereği silikon tipte güneş gözesi kullanan ekipler toplamda 6m^2 göze alanına sahip oldukları için 402 adet hücre kullanabilmekte ve dolayısı ile seçilen güneş gözeleri ile toplam teorik güç 1346,7W olmaktadır.



Şekil 4.5 ARIBA IV'ün Güneş Gözeleri

4.2.2 Maksimum Güç Noktası Takipçisi (MPPT)



Şekil 4.6 MPPT

Maksimum Güç Noktası Takipçisi güneş panellerinin sürekli maksimum güç noktasında çalışmalarını sağlayan bir güç elektroniği devresidir. Genelde güneş paneli uç gerilimi bara geriliminden düşük olduğu için yükseltici tip olarak tasarlanırlar. Bu devreler güneş panellerinden elde edilen enerjiyi anahtarladıklarından verimlerinin çok yüksek olması istenir. Bugün piyasada yaklaşık %99 verimlerde çalışan maksimum güç noktası takipçisi bulmak mümkündür. İTÜ Güneş Arabası

Ekibi World Solar Challenge 2011 yarışı için hazırladığı aracında 3 adet MPPT devresi kullanmayı planlamıştır.

4.2.3 Motor

Güneş arabaları genellikle 3 tekerli araçlardır. Dünyada tasarlanan 3 tekerlekli güneş arabalarının %95'e yakını arkada 1 önde 2 tekerleğe sahip ve arkadan tahriklidir. Güneş arabalarında kullanılan motorlar %95-98 verimlerde çalışabilen, ortalama 1000-1100 devir sayısına sahip, 1,8 – 5 kW güç arasında değişen (Wheel hub motor) tekerlek içi motorlardır[9]. Güneş arabalarında kullanılan bu motorlar genellikle Sabit Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motorları'dır. Şekil 7'de tekerlek içine yerleştirilmiş bir sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım motorunun 3 boyutlu (patlatılmış) görüntüsü verilmiştir.[10]



Şekil 4.7 Tekerlek içi Motorun Patlatılmış Görüntüsü

Bu tip tekerlek içine monte edilebilen motorların en önemli özelliği hiçbir aktarma organına ihtiyaç duymaması, aktarma organlarından kaynaklanan verim kaybı olmadığı için de sistem verimini attırmalarıdır.

İTÜ Güneş Arabası Ekibi, ürettiği araçların hepsinde (ARIBA, ARIBA II, ITURA, ARIBA IV) kendi tasarımı ve üretimi olan motorları kullanmıştır. Ancak piyasada üst seviyede rekabetçi olabilecek bir motor yüksek bir know-how düzeyi gerektirmektedir. Yerli üretim motorlarımızda, her ne kadar büyük bir bilgi ve tecrübe saklı olsa da, hem üretim kalitesinin, hem de AR-GE ile ilgili bazı detayların eksik olması sebebiyle tasarlanan motorların maksimum verimleri %90'ı geçememektedir. Bu nedenle World Solar Challenge 2011 yarışı için CSIRO firması tarafından üretilen ve ekip tarafından geliştirilen bir motor kullanılmasına karar verilmiştir.

4.2.4 Motor Sürücü



Şekil 4.8 Motor Sürücüsü

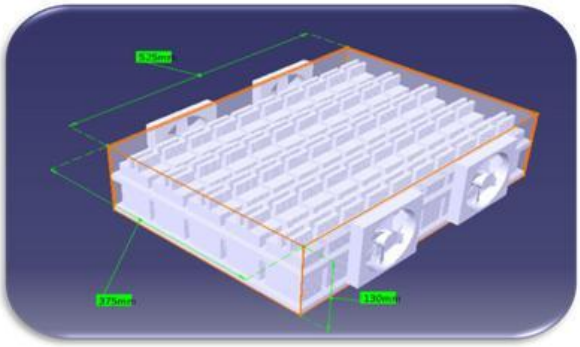
Motor sürücü adından da anlaşılacağı gibi motorun çalışmasını sağlayan bir güç elektroniği devresidir. Günümüzde güneş arabaları uygulamaları için farklı firmaların çıkarmış olduğu farklı güçlerde motor sürücüler bulmak mümkündür. İTÜ Güneş Arabası Ekibi, ürettiği tüm araçlarda aynı motor gibi yine kendi tasarımı olan motor sürücüleri kullanmıştır. Ancak yine tasarlanıp üretilen motor sürücülerin verimlerinin piyasada bulunabilen ürünlerden düşük olması nedeniyle World Solar Challenge 2011 için TRITIUM firmasının ürettiği WaveSculptor22 ürününü kullanmaya karar vermiştir. Bu motor sürücü %99,2 çalışma verimine sahip, sadece 855g ağırlığında yüksek verimli, düşük endüktanslı sabit mıknatıslı motorlar için özel üretilmektedir. Hem hafifliği hem de yüksek verimi ile güneş arabasının vazgeçilmez parçalarından biridir. [11]

4.2.5 Akü

Güneş arabası aküsüz de çalışabilmektedir. Güneş Panellerinden gelen güç doğrudan motora iletilebilir. Ancak akünün güneş arabasına sağladığı avantajlar vardır. Öncelikle aküler sayesinde araç hareket etmiyorken elde edilen enerjinin depolanması sağlanır. Akülerde depolanan bu enerji sayesinde de güneş panellerinden alınan güçten daha yüksek güçlerde aracı tahrik etmek mümkün hale gelmektedir. İkinci önemli özellik ise, yarış sırasında güneş panellerinden gelen güç istenilen ortalama hız için gereken güçten fazla olduğunda, bu fazla enerji aküye depolanarak daha sonra bu enerjinin yokuş tırmanırken ya da buluttan geçerken kullanılması sağlanabilmektedir.

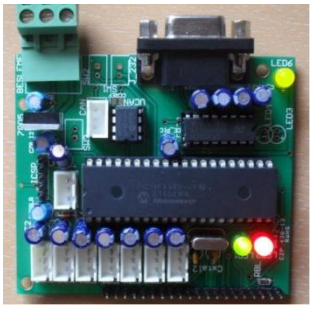
Akülerin olmadığı durumda güneş arabası için tek bir yarış stratejisi mevcuttur ki, bu da güneş panellerinden alınan tüm enerjinin kullanılması şeklindedir. Ancak araçta akü bulunması ile farklı yarış stratejileri geliştirilebilir.

Günümüzde güneş arabalarında Lityum İyon veya Lityum Polimer tipteki aküler enerji yoğunlukları yüksek olduğundan daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Bununla birlikte halen yarışlarda NiCd, NiMH, Kurşun Asit tipte akülere de izin verilmektedir. Ancak bu aküleri kullanmak takımlara ağırlık dezavantajı getirmektedir.



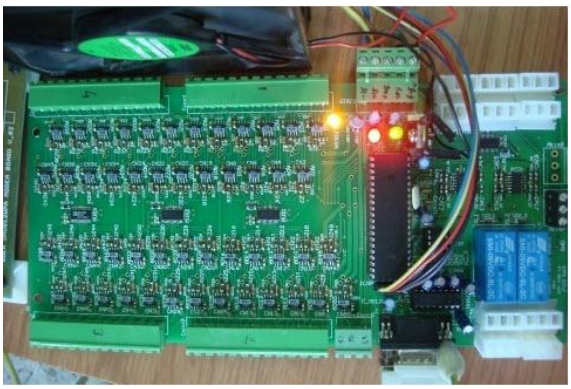
Şekil 4.9 ARIBA IV'te Kullanılan Akülerin 3 Boyutlu Çizimi

4.2.6 Elektronik Devreler

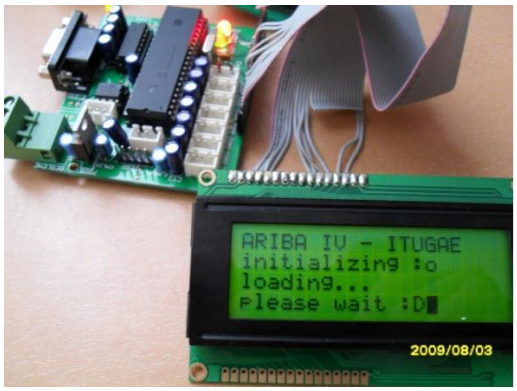


Şekil 4.10 Sıcaklık Ölçüm Devresi

Bir güneş arabasında buraya kadar sayılan komponentlerin yanı sıra birçok elektronik devre kullanılmaktadır. Bu devreler kısaca ölçüm devreleri, koruma devreleri, haberleşme devreleri, bilgilendirme devreleri olarak sıralanabilir. Aracın anlık olarak durumunu kontrol edebilmek adına birçok noktada birçok farklı komponentten ölçüm alınmaktadır. Bu ölçümler sıcaklık, akım, gerilim, yol eğimi, ivme gibi sıralanabilir. Ölçümlerin alındığı noktalardan ana kontrol devresine gönderilmesi için araç içi haberleşme devreleri kullanılmaktadır. Böylece tüm ölçümler bir merkezde toplanarak değerlendirilebilmektedirler. Daha sonra bu değerlendirmeler ışığında görsel elemanlarla sürücü, dış haberleşme ile de takım bilgilendirilmekte, aynı anda kontrol devresine kumanda edilerek olası durumlar için araç kontrol altında tutulmaktadır.



Şekil 4.11 Merkezi Kontrol Devresi



Şekil 4.12 Sürücü Bilgilendirme Devresi

5. GÜNEŞ ARABALARI YARIŞLARI

Güneş arabası yarışları farklı ülkelerde ve kıtalarda, güneş enerjisinin önemini vurgulamak adına düzenlenen organizasyonlardır. Aynı zamanda güneş arabası konseptinin oluşmasına vesile olarak, tasarlanıp üretilen bu araçlar üzerinde rekabet yaratmak suretiyle gelişmesine de olanak sağlamaktadırlar.

İlk güneş arabaları yarışı 1985 yılında gerçekleştirilen Tour De Sol'dur. 1985 – 1993 yılları arasında her yıl düzenlenen yarış bugün Avustralya, Amerika gibi ülkelerde düzenlenmekte olan uzun yol yarışlarına öncülük etmiştir. 1985 yılındaki ilk yarış için en öne çıkan kurallar güneş gözesi alanı ve akü enerji sınırıdır [12]. Daha o zamanlardan $6m^2$ güneş gözesi alanı ve 4.8kWh akü kapasitesi kurallarla belirlenmiş, günümüzde de bu kurallar tüm yarışlarda neredeyse %100'e yakın bir oranda korunmuştur.

Dünya çapında önemli güneş arabaları yarışı organizasyonları aşağıda verilmiştir [13]:

- ✓ World Solar Challenge
- ✓ South African Solar Challenge
- ✓ European Solar Challenge
- ✓ North American Solar Challenge
- ✓ Suzuka Dream Cup

Türkiye'de ise düzenlenen güneş arabası yarışı TÜBİTAK Formula G yarışıdır.

İstanbul Teknik Üniversitesi bünyesinde çalışmalarına devam eden İTÜ Güneş Arabası Ekibi (İTÜ-GAE) bugüne kadar TÜBİTAK Formula G ve World Solar Challenge yarışmalarına katıldığı için ilerleyen bölümde bu iki yarış için detaylı bilgiler verilecektir.

5.1 TÜBİTAK Formula G

TÜBİTAK Formula G Güneş Arabaları Yarışları ilk kez 2005 yılında TÜBİTAK'ın önderliğinde başlatılmıştır. 2004 yılı başında ilan edilen yarışa, ülke içerisinden farklı takımlar katılmak için hazırlıklar yapmışlardır. Formula G yarışları ilk

düzenlendiği 2005 yılından bu yana her yıl aralıksız düzenlenmektedir. Bu yarışın özelliği 30 turluk bir pist yarışı olmasıdır. İlk senelerde farklı parkurlarda düzenlenen yarışlar, son 3 senedir İzmir Pınarbaşı Pisti'nde düzenlenmektedirler.



Şekil 5.19 İzmir Pınarbaşı Yarış Pisti

Türkiye'deki gelişimine 2005 yılında başlayan güneş arabaları yarışı ve güneş arabası konsepti günden güne gelişimini sürdürmektedir. İlk yarışa sadece 16 takım katılmış, bu takımlardan 5 tanesi ilk turunu bile tamamlayamamıştır. Yarışın birincisi ise 8 tur atarak ortalama 22km/h ortalama hızla yarışı bitirmiştir.

Çizelge 5.1 Formula G 2005 Yarış Sonuçları

Sıra	Araç	Tur Sayısı	En iyi süre(dakika)
1	ORT	8	9:53.349
2	Hasat	7	8:39.952
3	YUGAT	6	7:24.238

2006 yılındaki ikinci senesinde, iki ayakta planlanmış, yarı final ayağı İzmir Pınarbaşı Pistinde yapılan ve EGE kupası olarak düzenlenen yarışın finali ise İstanbul PARK'ta yapılmıştır. Toplamda 31 takımın katıldığı yarışların EGE ayağında sıralama turlarında ilk ona giren takımlar yarı finalde yarışma şansı yakalamıştır. Toplamda 20 aracın yarıştığı EGE kupasının sonuçları aşağıdaki gibidir.

Çizelge 5.2 Formula-G 2006 Ege Kupası Yarış Sonuçları

Sıra	Araç	Tur Sayısı	En iyi süre(dakika)
1	İTÜ ARIBA-1	30	2:18.003
2	SAÜ SAGUAR X5	30	2:19.438
3	İTÜ ARIBA-2	25	2:46.859

2006 yılının final ayağında ise, sıralama turlarında ilk 9'a giren toplam 18 takım yarışmıştır.

Çizelge 5.3 Formula-G 2006 Türkiye Kupası Yarış Sonuçları

Sıra	Araç	Tur Sayısı	En iyi süre(dakika)
1	İTÜ ARIBA-1	30	2:42.872
2	İTÜ ARIBA-2	28	2:53.937
3	YTÜ BARRACUDA	25	3:11.131

Bu sonuçlardan görülmektedir ki, yarışmanın ilk senesinden ikinci senesine gelindiğinde takımlar bilgi birikimlerini arttırmış en iyi tur zamanları 3 kata yakın oranda iyileşmiştir.

2007 yılında ise toplamda 41 takım yarışa katılmıştır. Formula G yarışına katılan üniversitelerin listesi aşağıda verilmiştir.

Çizelge 5.4 Formula G'ya Katılan Takımlar

Anadolu Üniversitesi	İstanbul Teknik Üniversitesi
Ankara Üniversitesi	Kırıkkale Üniversitesi
Bahçeşehir Üniversitesi	Kocaeli Üniversitesi
Boğaziçi Üniversitesi	Marmara Üniversitesi
Celal Bayar Üniversitesi	Mersin Üniversitesi
Dicle Üniversitesi	Muğla Üniversitesi
Dokuz Eylül Üniversitesi	Ortadoğu Teknik Üniversitesi
Dumlupınar Üniversitesi	Sabancı Üniversitesi
Ege Üniversitesi	Sakarya Üniversitesi
Erciyes Üniversitesi	Selçuk Üniversitesi
Fırat Üniversitesi	Süleyman Demirel Üniversitesi
Gazi Üniversitesi	Yıldız Teknik Üniversitesi
Hacettepe Üniversitesi	Zonguldak Karaelmas Üniversitesi

Çizelge 5.5 Formula-G 2007 Yarış Sonuçları Çizelgesu

Sıra	Araç	Tur Sayısı	En iyi süre(dakika)
1	İTÜ ARIBA-1	30	1:53.881
2	İTÜ ARIBA-2	30	1:55.578
3	SAÜ SAGUAR X6	29	1:58.609

Çizelge 5.6 Formula-G 2008 Yarış Sonuçları Çizelgesu

Sıra	Araç	Tur Sayısı	En iyi süre(dakika)
1	İTÜ RA	30	
2	İTÜ ARIBA-2	30	
3	Boğaziçi Üniversitesi	29	

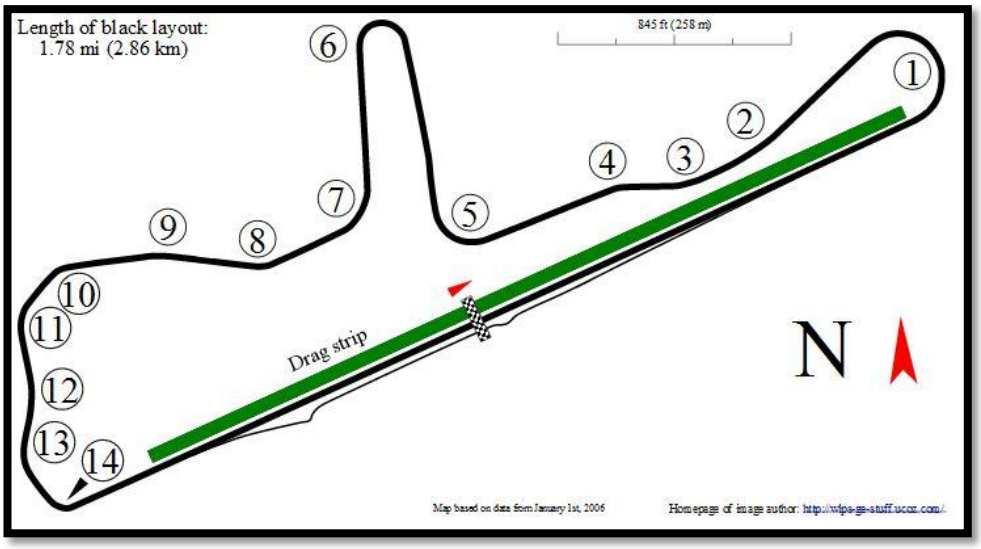
5.2 World Solar Challenge

World Solar Challenge, Avustralya kıtasının baştanbaşa geçildiği Darwin şehrinden başlayıp Adealide şehrinde biten 3021 km'lik bir güneş arabası yarışıdır. İlk kez 1987 yılında düzenlenen yarışmanın 11.si Ekim 2011 tarihinde yine Avustralya kıtasında düzenlenecektir.



Şekil 5.2 WSC Yarış Rotası

Dünyanın birçok gözde üniversitelerinin katıldığı World Solar Challenge dünyanın en prestijli güneş arabası yarışı olarak kabul edilir. Hem pist hem uzun yol yarışını içinde barındıran etkinliğin pist ayağı, uzun yol yarışı için sıralamanın belirlenmesi için yapılmaktadır.



Şekil 5.3 Pist yarışının yapıldığı Hidden Valley Yarış Pisti'nin kuşbakışı görüntüsü

Yarış; sabah saat 08.00'de başlayıp, akşam 17.00'de son bulmaktadır. Ekipler kurallar gereğince gittiği yola göre belirli aralıklarla konulmuş kontrol noktalarında yarım saat süreyle beklemek zorundadır. Kontrol süresince araçlar üzerinde herhangi bir değişiklik ya da onarım yapılamamaktadır. Yarış süresince her gün 17.00'da ekipler uygun bir yerde araçlarını durdurarak, konaklamaktadırlar. Bu esnada araç üzerinde bakım ve onarım yapılabilmekte, araçlarının bataryaları sadece güneşten alınan enerji ile şarj edebilmektedir. Sonraki gün yine sabah saat 08:00'da ekipler yarışa kaldıkları yerden devam etmektedirler.

Çizelge 5.7 WSC 2007 ve 2009 Yarışlarını Kategorilerinde Birinci Olarak Tamamlayan Ekipler

Yıl	Sınıf	Kazanan Araç	Takım	Ülke	Toplam Yarış Süresi (sa:dk)	Ortalama Hız (km/h)
2007	Challenge	Nuon Solar Team	TU Delft	Hollanda	33:00:00	90.87
	Adventure	TIGA	Ashiya University	Japonya	32:03:00	93.57
2009	Challenge	Tokai Challenger	Tokai University	Japonya	29:49:00	100.54
	Challenge Class Silicon	Sunswift IVy	University of New South Wales	Avustralya	39:18:00	76.28
	Adventure	OSU Model S'	Osaka Sangyo University	Japonya	34:45:00	86.27

Görüldüğü gibi World Solar Challenge ile Tübitak Formula G yarışları birbirinden çok farklıdır. WSC yarışmasına katılan bazı takımlar, yarışı ortalama 100 km/h hızla bitirebilmektedirler. Bu nedenle bu yarışlara katılan takımlar için verimlilik çok önemlidir. World Solar Challenge 2009 yarışına katılan takımların bazıları Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.8 WSC 2009 Yarışı katılımcılarının bir kısmı

Katılımcı	**Ülke**
Tokai University	Japonya
TU Delft	Hollanda
University of Michigan	Amerika
University of New South Wales	Avustralya
MIT	Amerika
Principia Collage	Amerika
Bochum University of Applied Sciences	Almanya
Stanford University	Amerika
Nanyang Technological University	Singapur
Cambridge University	İngiltere
İTÜ	Türkiye

6. YARIŞ SİMÜLASYONU

6.1 Pist Yarışı

6.1.1 IPG/CarMaker Seyir Dinamiği Simülasyon Programı ve Oluşturulan Model

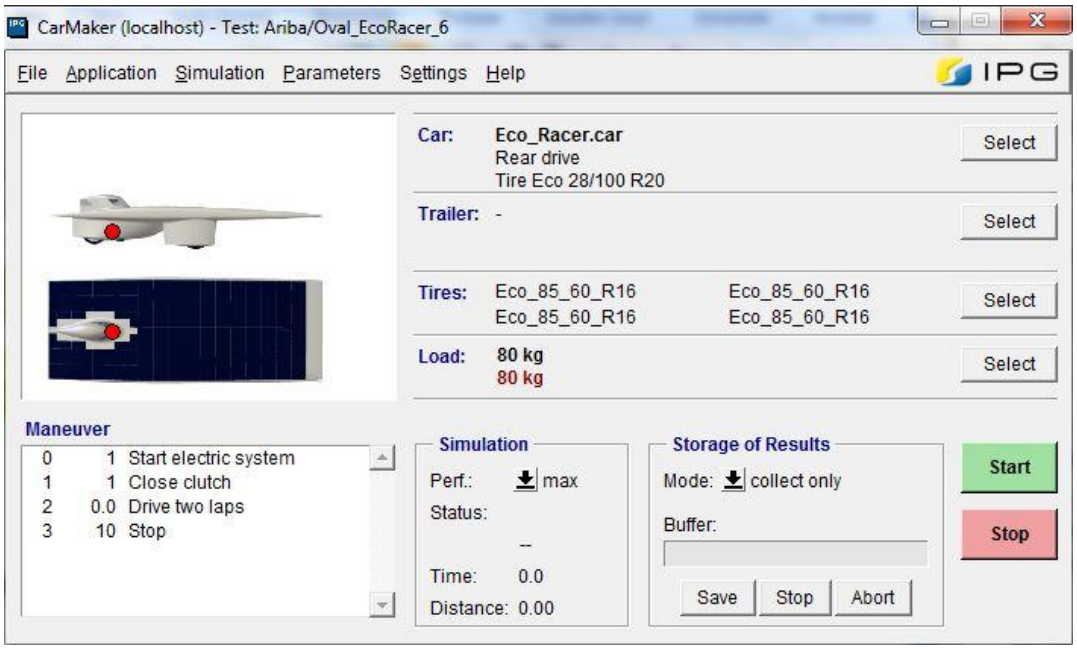
IPG/CarMaker Seyir Dinamiği Simülasyon Programı, dinamik davranışları belirlenmek istenen bir taşıtın özelliklerinin tanıtılması sureti ile istenilen koşul ve parkurlarda seyir dinamiği analizleri yapabilen, bu analizleri hem 3 boyutlu görsel halde (animasyon) hem de taşıt parametrelerinin değişimini grafiksel olarak sunabilen bir yazılımdır.

Dinamik davranışları belirlenmek istenen taşıt 3 tekerlekli olduğundan, öncelikle programda 3 tekerlekli (önde 2, arkada 1) bir taşıt örneği oluşturmak gereklidir. Yazılım binek taşıtların analizi için hazırlandığından, tüm taşıt örnekleri 4 tekerleklidir. 3 tekerlekli taşıt örneği, arka taraftaki 2 tekerleğin koordinat sisteminin y ekseninde aynı noktalara oturtulup çakıştırılması sureti ile oluşturulmuştur.

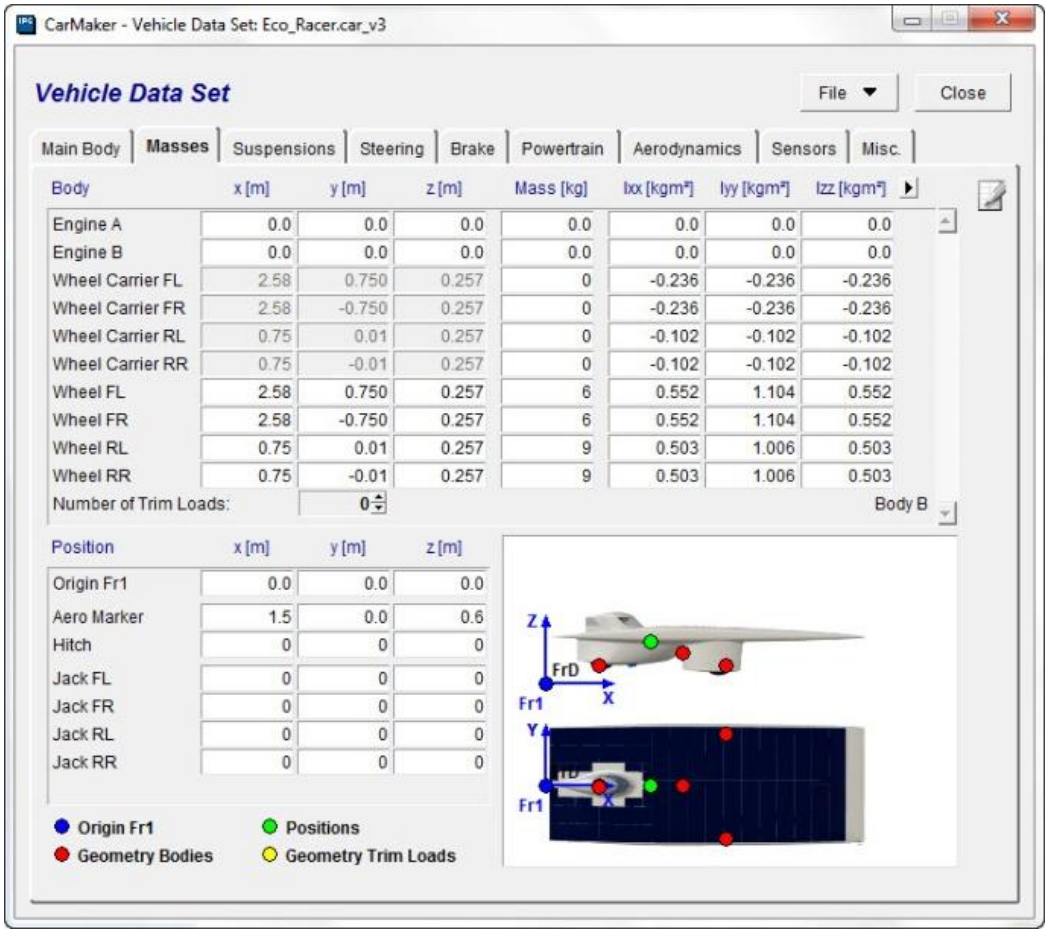
Taşıt parametreleri bölümüne, güneş arabası ile ilgili tüm parametreler girilmiştir. Bu parametreler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- ✓ Asılmış kütlelerin ağırlığı ve koordinatları
- ✓ Asılmamış kütlelerin ağırlığı ve koordinatları
- ✓ Amortisör ve yay sertlikleri
- ✓ Direksiyon sistemi çevrim oranı
- ✓ Fren sistemi parametreleri
- ✓ Motor tork eğrisi

Şekil 6.1 ve 6.2'de programın kullanıcı arayüzünden görüntüler verilmiştir.



Şekil 6.1 Programın Ana Ekranının Görüntüsü

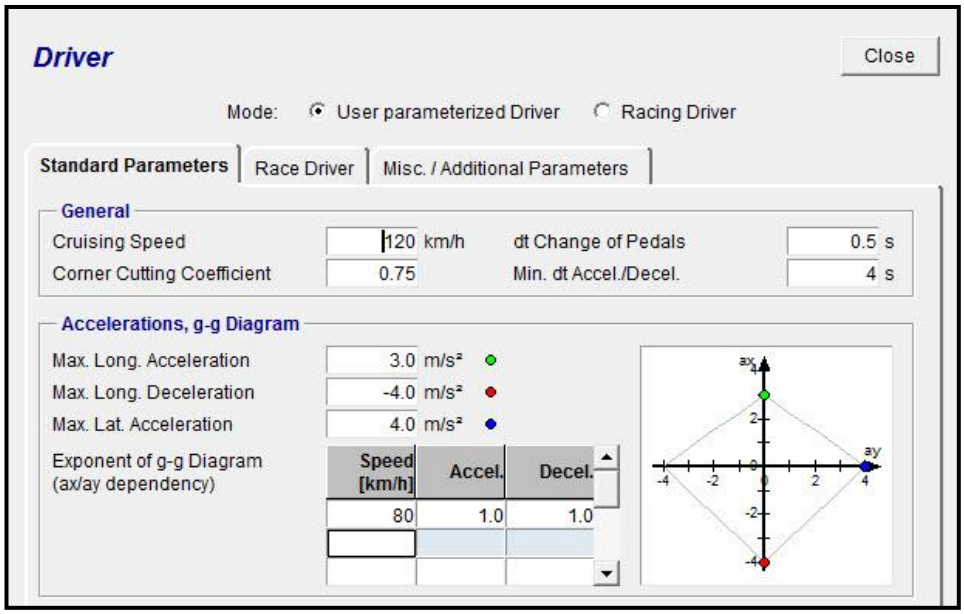


Şekil 6.2 Taşıt Parametrelerinin Girildiği Ekranın Görüntüsü

6.1.2 Simülasyon Programındaki Sanal Sürücü

Yapılan simülasyonda aracı farklı şekillerde kontrol etmek mümkündür. Taşıt, istenirse önceden belirlenmiş hız profilleri ya da hız kontrolörü ile kontrol edilebildiği gibi bir sanal sürücü (sürücü modeli) ile de kontrol edilebilir. Sanal sürücü (Şekil 6.3) sayesinde taşıt simülasyonuna gerçek bir sürücünün kontrol davranışlarını eklemek mümkün olmaktadır. Böylelikle farklı özelliklerde (defansif, normal, agresif) sürücü modelleri ile simülasyon yapmak da olasıdır. Direksiyon simidinin saptırılması, frenleme, gaz pedalının pozisyonunun değiştirilmesi ve vites değiştirme sürücü davranışlarıdır. Sanal sürücünün davranışları şöyle özetlenebilir:

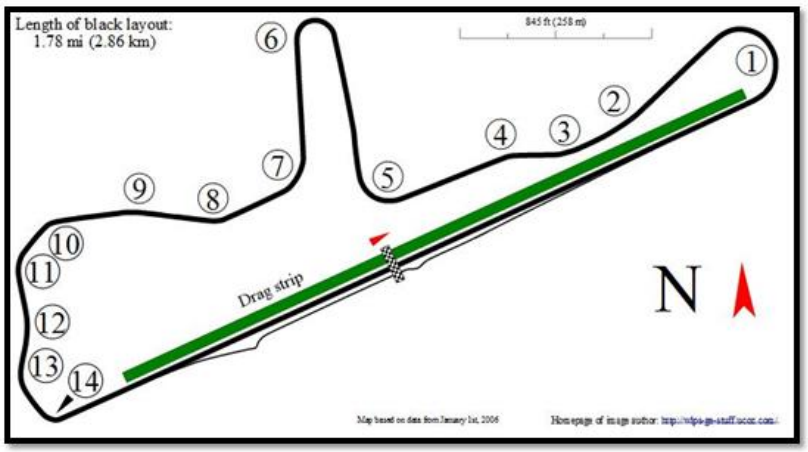
- ✓ Yol çizgileri içinde gidilecek rotaya karar vermek (corner cutting)
- ✓ Direksiyon hâkimiyeti (Direksiyon kontrolü)
- ✓ Taşıt ve gidilen rotanın özelliklerine göre taşıt hızına karar vermek
- ✓ Hızlanma ve yavaşlamada pedallara insani tepki süreleri ile kumanda etmek



Şekil 6.3 Sürücü Özelliklerinin Belirlendiği Ekran Görüntüsü

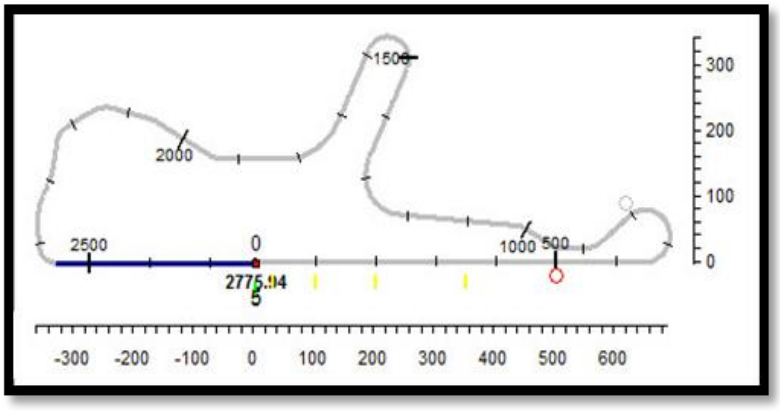
6.1.3 Sanal Sürüş Dinamiği Alanı Avustralya'daki Kualifikasyon Pisti

Dünyanın birçok gözde üniversitesinin (MIT, Stanford, Berkeley gibi) katıldığı World Solar Challenge dünyanın en prestijli güneş arabası yarışı olarak kabul edilmektedir. Hem pist hem uzun yol yarışını içinde barındıran etkinliğin pist ayağı, uzun yol yarışı için sıralamanın belirlenmesi için yapılmaktadır. Pistin görüntüsü şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4 Yarış Pistinin Üstten Görünüşü

Pist ile ilgili dönemeç çaplarını veren hazır veriler olmadığından, pistin ölçekli resmi ve bir dijital görüntü işleme yazılımı kullanılarak pistin koordinatları çıkarılmıştır. Çıkarılan bu koordinatlar IPG/CarMaker yazılımına tanıtılmıştır. Şekil 6.5'te programa tanıtılan koordinatların çıktısı görülmektedir.



Şekil 6.5 Yarış Pistinin IPG/CarMaker'da Tanımlanmış Hali

6.1.4 Simülasyon Koşulları ve Simülasyonlar

Bu çalışmada yapılan simülasyonlar 2 aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada güneş arabasının standart manevralara vereceği tepkiler incelenmiştir. İkinci aşamada ise, pist koşullarında taşıtın davranışları incelenmiştir.

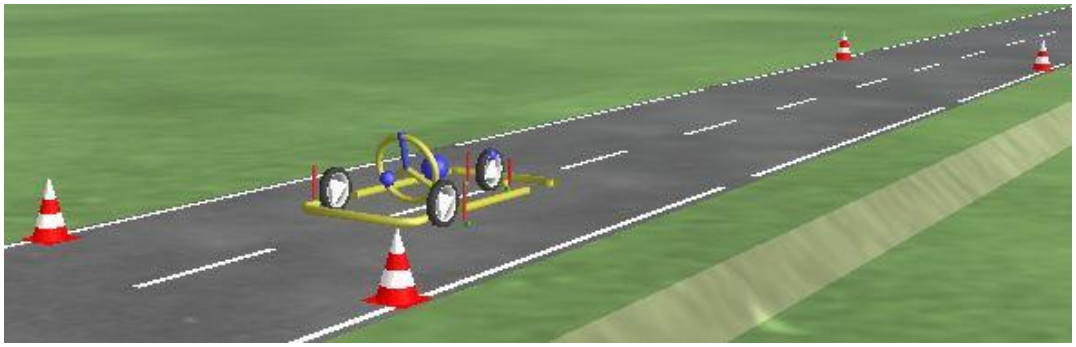
6.1.4.1 Standart Manevralar

a) Düz Yolda Fren Testi

Yarış kuralları gereği aracın belirli hızlarda belirli frenleme ivmelerini sağlayarak istenilen mesafede durması sağlanmalıdır. Frenleme performansı ile ilgili kural şu şekilde verilmiştir: "Taşıt, seyahat edebildiği tüm hızlardan ortalama -3,8 m/s^2

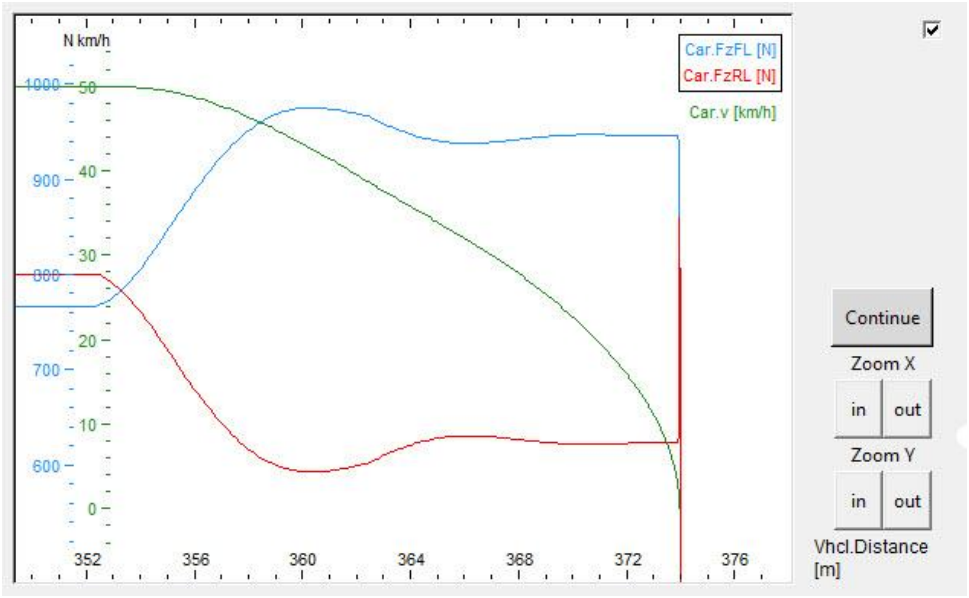
ivmelenme ile durabilmelidir. Aracın 50 km/h ile gidilirken 25 metrede, 35 km/h ile gidilirken 12,5 metrede durabildiği gösterilmelidir.”

Bu kuralı sağlayabilmek için modellenen güneş arabası düz bir yolda belirtilen hıza kadar hızlandırılmış, bu hızla giderken tam frenleme yaptırılarak durma mesafesi ve frenleme sırasındaki yük aktarımları incelenmiştir. Şekil 6.6’da 50 Km/h hız için fren testi sonuçları görülmektedir.



Şekil 6.6 Düz Yolda 50 Km/h Hızda Frenleme Testi

Şekil 6.7’deki grafikten de görülebileceği üzere taşıt 50 km/h sabit hızla giderken başlangıç noktasından 350m sonra frenleme yaptırılmış ve 21,5 m’de durmuştur.



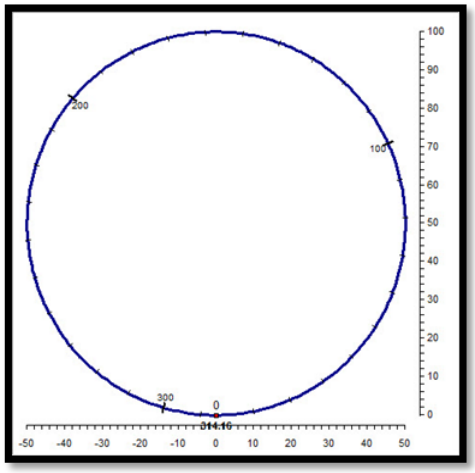
Şekil 6.7 Düz Yolda 50 Km/h Hızda Frenleme Testi Sonucu Arka Tekerlekten Ön Tekerleğe Yük Aktarımı

Taşıt 35 Km/h sabit hızla giderken başlangıç noktasından 250m sonra frenleme yaptırılmış ve 11 m’de durmuştur. Azami frenleme ivmesi olan 0.7g değerinde 100 kg olan arka aks yükü 42 kg değerine düşmektedir.

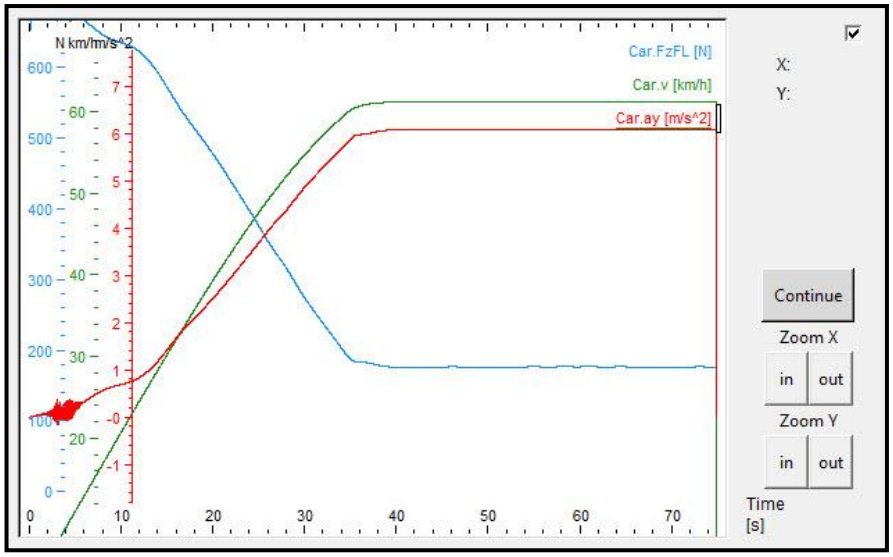
b) Sabit Yarıçaplı Dönemeç Hareketi

Sabit çaplı dönemeç hareketi testi, taşıtın dönemeç içerisinde stabilitesini kaybetmeden maruz kalabileceği maksimum yanal ivmenin tayini için yapılmıştır. Test, şekil 6.8'de grafiği verilen 50 m sabit yarıçaplı dönemeçte gerçekleştirilmiştir. Testte taşıt saat yönünün tersine ve 62 km/h hız ile hareket etmiştir.

Şekil 6.9'da iç tekerde yük transferi sebebiyle oluşan yük azalması, yanal ivme ve araç hızı görülmektedir. Taşıtın devrilmeden maruz kalabileceği maksimum yanal ivme yaklaşık 0.6g olarak bulunmuştur. Tekerlek yükünün 15kg'ın altına düşmesi durumu, arabanın devrilmeye başladığı sınır olarak kabul edilmiştir. Bu sınırın tam sıfır kg. alınmamış olması, hesaba katılamayan bazı fiziksel şartlar için (yan rüzgar, tümsek-çukur gibi yol geometrileri) emniyetli tarafta kalınmak istenmesindendir.



Şekil 6.8 50m Sabit Yarıçaplı Dönemeç Hareketi



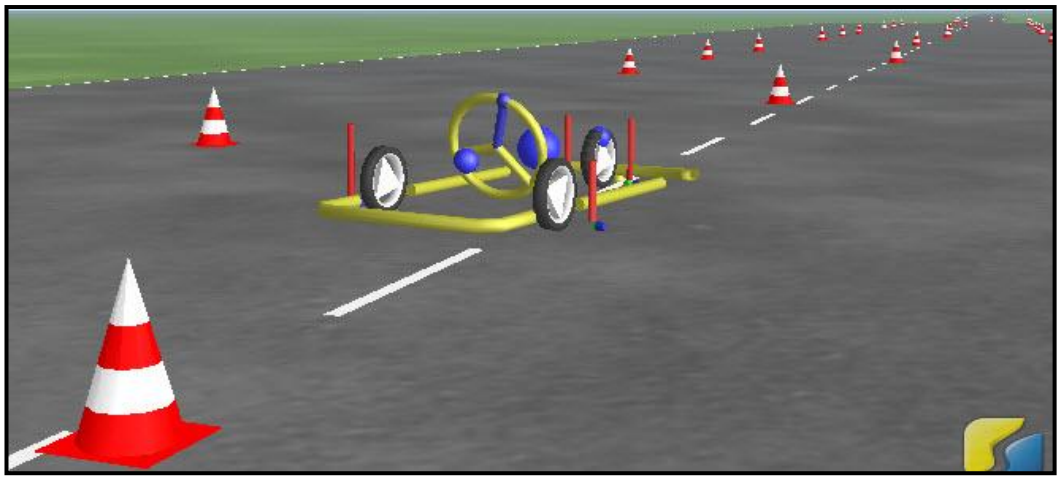
Şekil 6.9 Sabit Yarıçaplı Dönemeç Testinin Çıktıları

Çizelge 6.1 Analiz Sonuçları ile Teorik Hesabın Karşılaştırılması

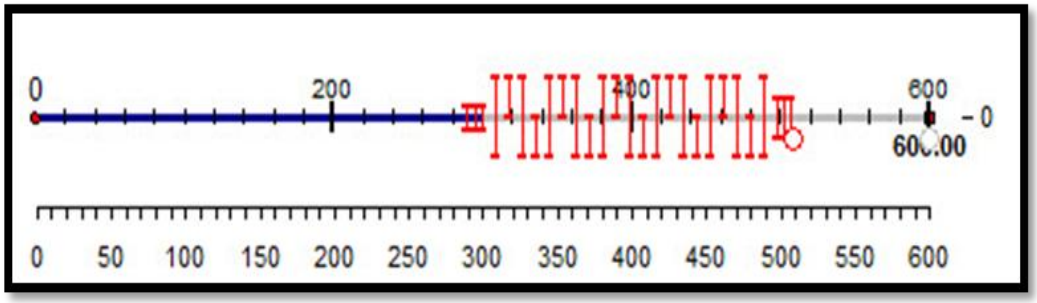
Hesaplanacak Değişken	İstenilen Değer	Teorik Hesap	CarMaker Analizi
Fren mesafesi (50km/h hızda giderken)	25 m	19,6 m	21,5 m
Fren mesafesi (35km/h hızda giderken)	12,5 m	9,4m	11,0 m
Devrilme Sınırı	0,55 g	0,5 g	0,6 g
Kafa vurma (50 Km/h sabit hızda)			
0.38g ile Frenlemede ΔF_{za}		-20 kg	-24 kg
0.5g ile Frenlemede ΔF_{za}		-27 kg	-32 kg
0.7g ile Frenlemede ΔF_{za}		-53 kg	-58 kg

c) Slalom Hareketi

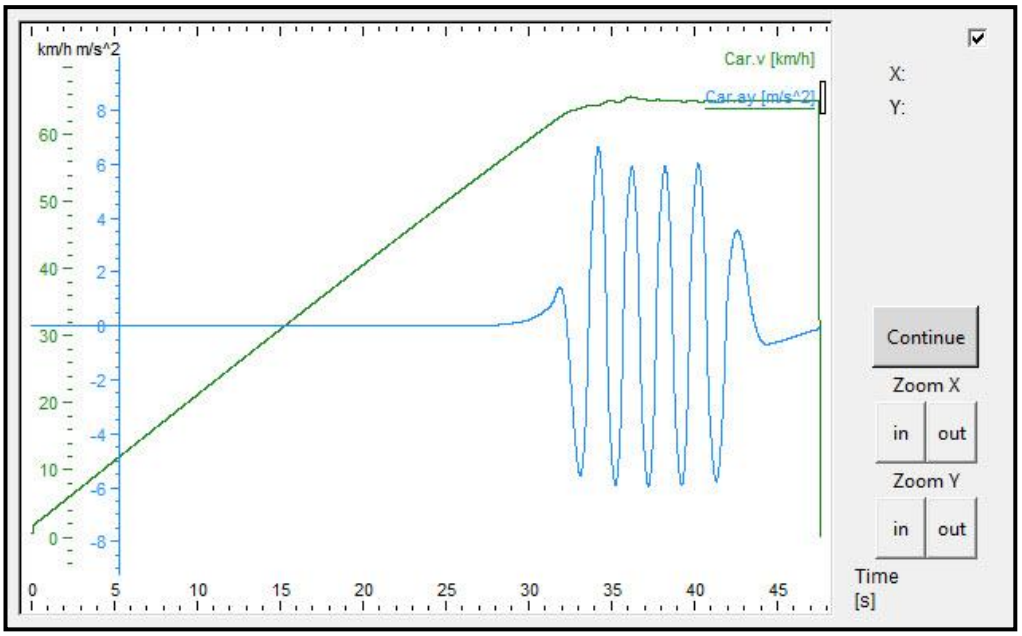
Taşıtın performans özelliklerini kontrol etmek için yapılan diğer bir analiz de slalom testidir. Taşıt 18m aralıklarla yerleştirilmiş kukaların arasından geçmektedir. Şekil 6.10'da 3 boyutlu görsel, Şekil 6.11'de ise 2 boyutlu pist verisi gözükmektedir. Azami yanal ivme 6 olduğundan, bu slalom testi şartlarında azami slalom testi hızı 65 olmaktadır. İlgili grafik şekil 6.12'de verilmiştir.



Şekil 6.10 Slalom Testi



Şekil 6.11 Slalom Testi Parkur Geometrisi (CarMaker Pist Penceresi)



Şekil 6.12 Slalom Test Sonuçları

d) Virajda Fren Analizi

Virajda fren analizi iki farklı durumun kontrolü için yapılmaktadır. Bu durumlar:

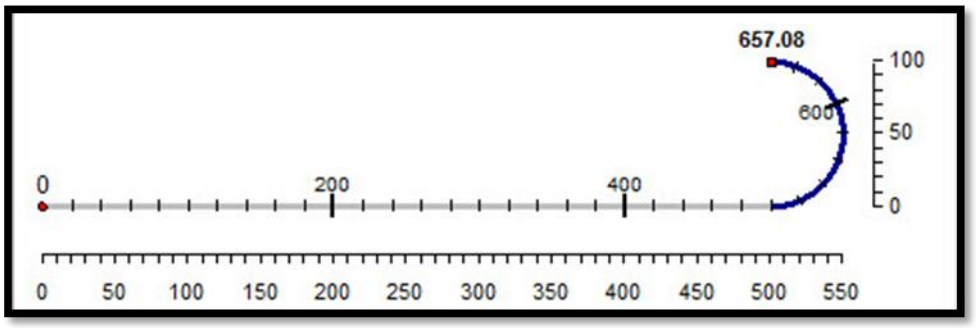
- Devrilme kontrolü
- Detaylı incelemelerde fren başlangıç anından sonraki 1. saniyenin sonundaki durumun etüdü

Detaylı incelemelerde fren başlangıç anından sonraki 1. Saniyenin sonundaki durumun etüdü yapılırken büyüklükler olarak;

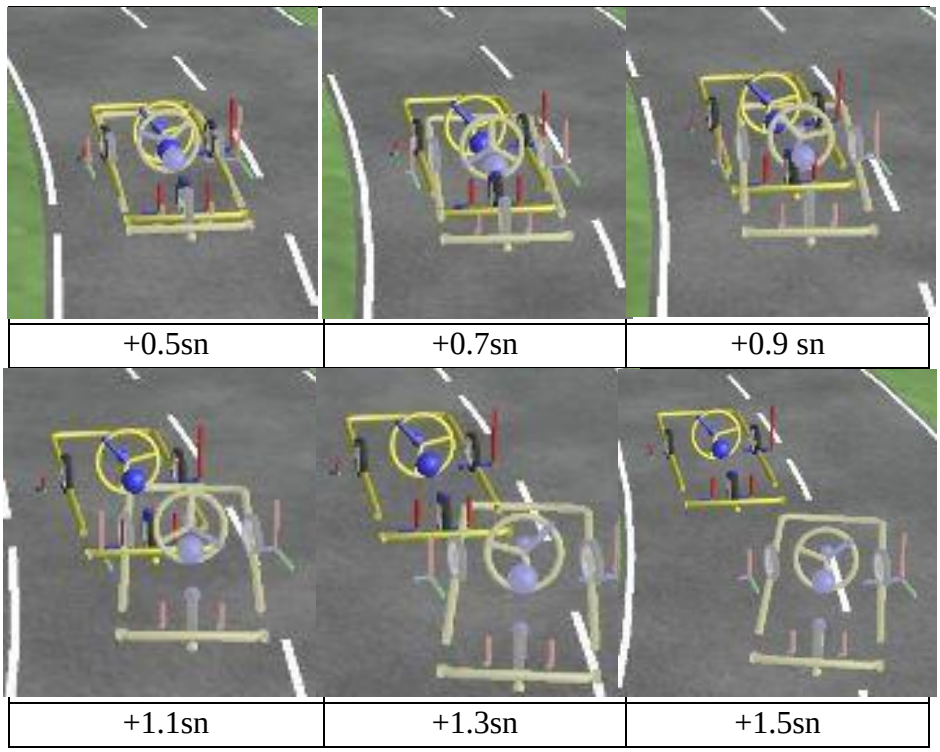
- Yan yönde istenen yörüngeden sapma
- Yaw rate (düşey eksen etrafında dönme (savrulma) hızı)
- Yüzme açısı

değişkenleri kontrol edilir. Bu çalışmada sadece azami frenlemedeki stabilite kaybı ve devrilme olayı niceliksel olarak animasyon vasıtasıyla incelenmiştir.. Yukarıda sıralanan taşıt seyir durum değişkenleri sayısal olarak değerlendirilmemiştir.

Düz yolda hızlandırılan taşıt 50m yarıçaplı bir dönemecin ortasında frenlendirilmek sureti ile durdurulmaya çalışılmış, bu süreçte de aracın az döner karakterde davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 6.13'te parkur geometrisi, Şekil 6.14'te fren yapan ve yapmayan iki taşıtın karşılaştırılması frenleme anından sonraki 0.5-1.5 saniye için verilmiştir.



Şekil 6.13 Virajda Fren Testi Parkur Geometrisi



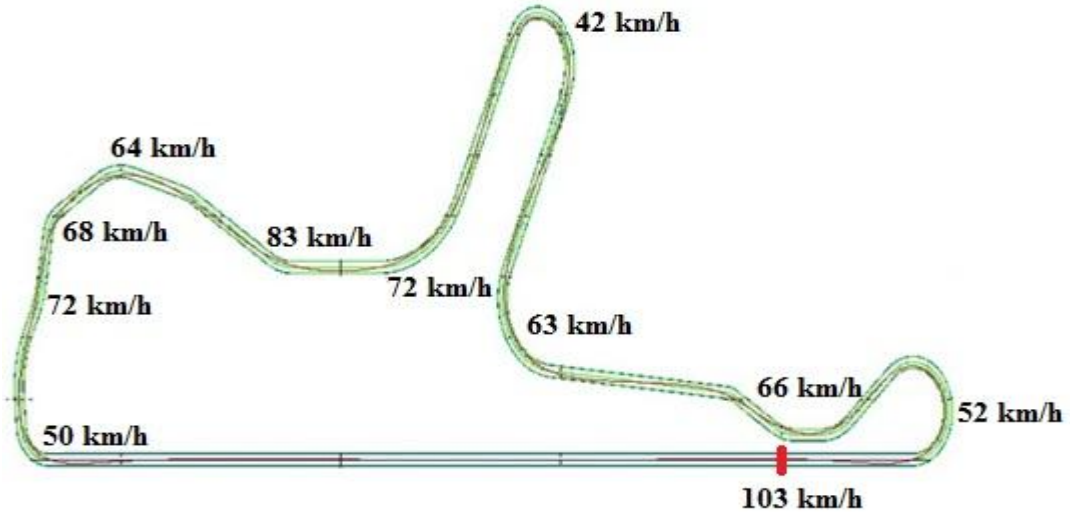
Şekil 6.14 Viraj İçinde Frenleme Anından İtibaren Aracın Davranışı

6.1.4.2 Pist Koşuları ve Sonuçları

Bu bölümde, bölüm 5'te bahsi geçen pist üzerinde yapılan analizler anlatılacaktır.

Bir pistte analiz yapmanın temel amacı, o pist için gereken tur zamanını belirlemek ve gerektiği durumlarda tasarım değişkenlerine geri dönerek, taşıtı seyir dinamiği bakımından optimize etmek üzere çeşitli teknik değişiklikler öngörmeye çalışmaktır. Bu çalışmada tasarımın en son gelinen hali için pistte her dönemeçte aracın izin verdiği maksimum yanal ivme ile dönülmüş, minimum tur zamanı sağlanmaya çalışılmıştır.

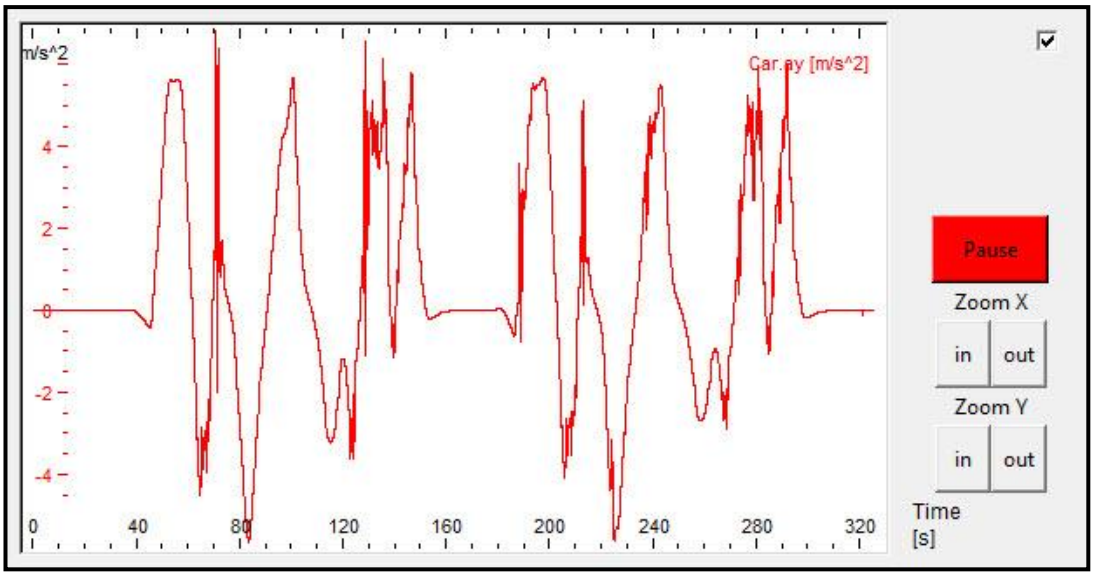
Şekil 6.15'teki pist boyunca hızın değişimi grafiğine bakılacak olursa start finish düzlüğünün sonunda 103 Km/h maksimum hıza ulaşılmıştır.



Şekil 6.15 Pist boyunca hız grafiği

Pist simülasyonu sonunda görülmüştür ki; minimum tur zamanı 2 dakika 20 saniye civarındadır.

Şekil 6.16'da pist boyunca taşıta etkiyen yanal ivmenin grafiği verilmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere yanal ivme istenilen maksimum yanal ivme sınırındadır. Bu şekilde dönemeçler en hızlı şekilde dönülerek minimum tur süresi sağlanmıştır. Bu fiziksel sınırlara güneş arabasını yarış şartlarında sürecek olan sürücülerin ulaşıp ulaşamayacağı ise ayrı bir husustur.



Şekil 6.16 Yanal ivme

6.2 Çok Dönemeci Olmayan Uzun Yol Yarışı

6.2.1 Araç Modeli

Araç modeli, elektrik motoru modeli (kısaca motor modeli) ve taşıt seyir dirençlerinin oluşturduğu yük modelinin (kısaca yük modeli) birleşiminden oluşmaktadır.

6.2.1.1 Motor Modeli

Motor modeli, araçta kullanılan fırçasız doğru akım motorunun sanal ortamda (bilgisayar ortamında) temsil edilmesi anlamına gelmektedir. Sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları çok verimli elektrik makineleridir. Araçta CSIro firmasının ürünü olan fırçasız bir doğru akım motoru kullanılacaktır. Bu motorun özellikleri ve parametreleri aşağıda verilmiştir.

Çizelge 6.2 Temel Büyüklükler [14]

Kutup Sayısı	40
Faz Sayısı	3
Ortalama Ağırlık (kg)	10,9
Nominal Hız (rad/s)	111
Nominal Tork (Nm)	16,2
111 rad/s de Maksimum Sürekli Tork (Nm)	31
Faz Direnci (Ω)	0,0757
EMF Katsayısı – L-N RMS EMF/speed (Vs/rad)	0,39
Tork Katsayısı Tek Faz için (Nm/A)6	0,39

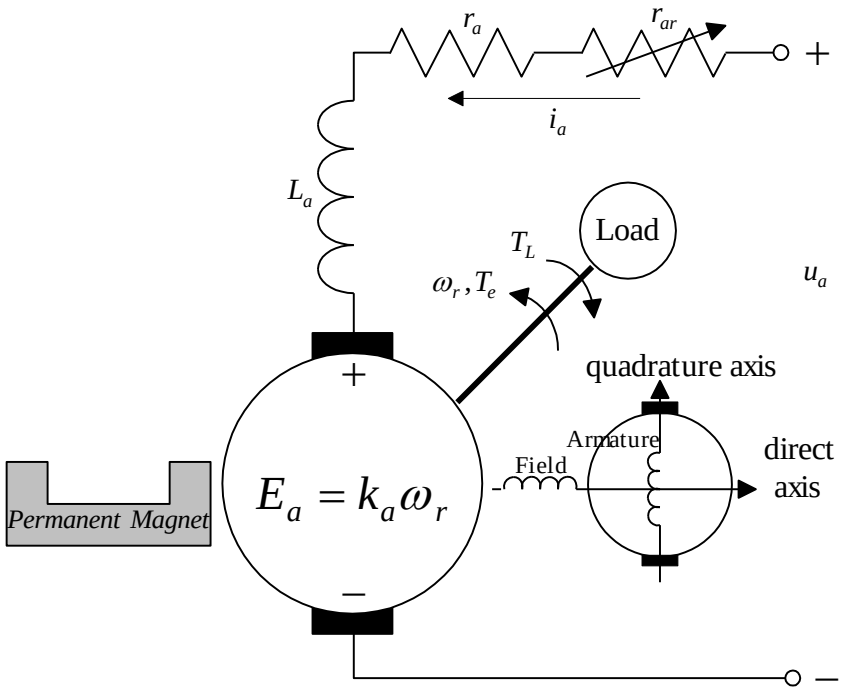
Çizelge 6.3 Nominal Güçte Performans Değerleri [14]

L-N RMS EMF (V)	43
Faz Akımı RMS (A)	13,9
Bakır Kayıpları (W)	43,9
Girdap Akımı Kayıpları (W)	2,6
Hava Kayıpları (W)	2,1
Toplam Kayıp (W)	48,6
Çıkış Gücü (W)	1800
Verim (%)	97,4

Çizelge 6.4 Maksimum Performans Değerleri [14]

Maksimum Sargı Sıcaklığı (K)	383
Maksimum Hız (rad/s)	300
Maksimum Tork (Nm)	50,2

Şekil 6.17'de sabit mıknatıslı bir doğru akım makinesinin şematik diyagramı verilmiştir.

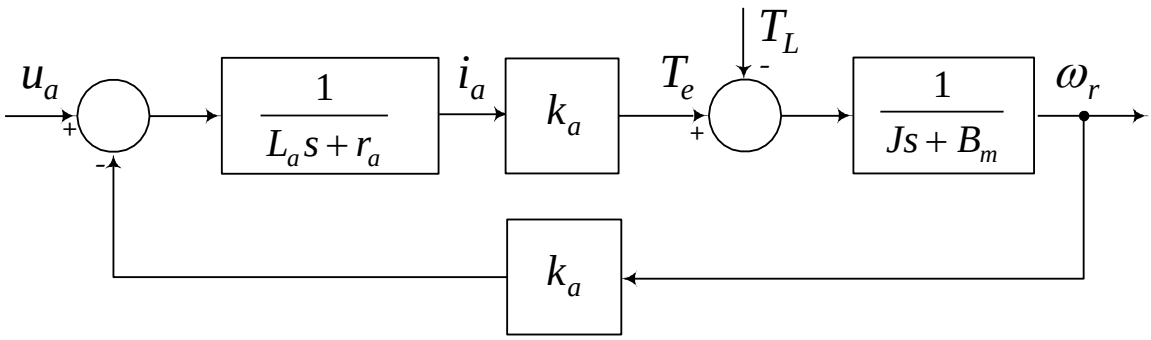


Şekil 6.17 Sabit Mıknatıslı Doğru Akım Makinesinin Şematik Diyagramı

Kirchhoff'un gerilim kanunu ve Newton'un 2.hareket kanunu kullanılarak, sabit mıknatıslı doğru akım makinasının diferansiyel denklemleri kolayca çıkarılabilir. Duyarlılığın sabit olduğu kabulü yapıldığında (aslında sıcaklığın bir fonksiyonudur), mıknatıs kutupları tarafından oluşturulan akı sabittir. Bununla beraber geri emk (back emf) ve tork sabitleri k_a olarak isimlendirilirse, aşağıda verilen diferansiyel denklemler motor karakteristiklerini göstermektedirler [15].

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{r_a}{L_a} i_a - \frac{k_a}{L_a} \omega_r + \frac{1}{L_a} u_a \tag{1}$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{k_a}{J} i_a - \frac{B_m}{J} \omega_r - \frac{1}{J} T_L \tag{2}$$



Şekil 6.18 Motor Modeli

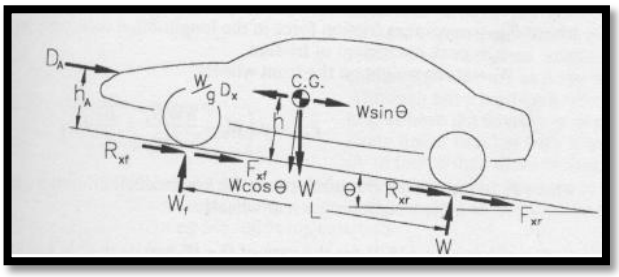
6.2.1.2 Yük Modeli

Yük Modeli, aracın karşılaştığı direnç kuvvetlerinin (seyir dirençleri) sayısal ifadesi olarak tanımlanabilir. Şekil 6.19'da taşıta etki eden kuvvetler şematik olarak gösterilmiştir. Taşıtın herhangi bir seyir anı göz önüne alınacak olursa, sabit hızla giderken etkiyen dirençler (aracı yavaşlatmaya çalışan kuvvetler) :

a) Aerodinamik Direnç
b) Yuvarlanma Direnci (Tekerlek Direnci adı ile anılan dirençler grubu içindeki en baskın direnç kuvvetidir.)
c) Yokuş Direnci

Buna ilaveten araç pozitif ivme ile hızlandırılmak ya da negatif ivme ile yavaşlatılmak istendiğinde yukarıdaki direnç kalemlerine 4. temel direnci de eklemek gerekecektir:

d) İvme Direnci
e) Diğer Dirençler



Şekil 6.19 Araca Etkiyen Kuvvetler

a) Aerodinamik Direnç Kuvveti

Aerodinamik, genel anlamda havanın kuvvetsel etkilerini inceleyen bilim dalıdır. Katı bir cisim etrafında akan hava veya hareketsiz duran hava içinde hareket eden katı cisim söz konusu olduğunda hava, aerodinamik kanunlarına uygun davranır. Havanın göreli hareketinden kaynaklanan kuvvetler taşıma ve sürükleme

kuvvetleridir. Bu kuvvetler direnç kuvvetleridir. Hava taşımacılığında bu iki kuvvet önemli yer tutarken kara nakil araçları için belli bir hıza kadar direnç sadece sürükleme kuvveti olarak göz önüne alınır. Kuvvetler, hızın karesi ile orantılıdır. Aerodinamik direnç, aracın yüksek ve sabit hızlarla, yokuşsuz (veya az yokuşlu) bir parkurda seyri sırasında yenmesi gereken en önemli dirençtir [16]. Aerodinamik direnç kuvveti formülü ve gerekli katsayılar aşağıda verilmiştir.

$$F_A = \frac{1}{2} * \rho * A_f * C_D * V^2 \quad (1)$$

$\rho = 1.293\ (Hava\ Yoğunluğu)$

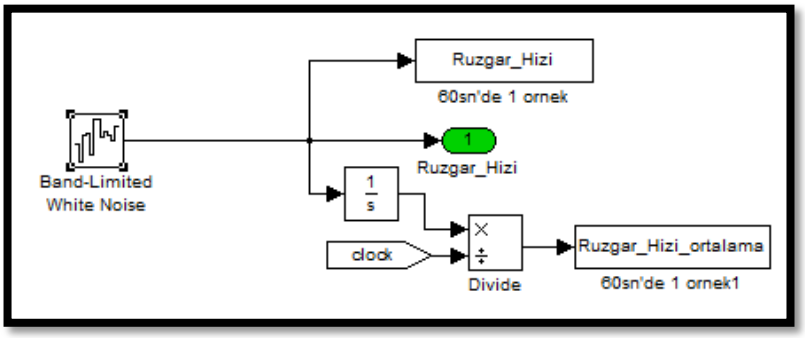
$A_f = 0{,}76\ m^2\ (Ön\ Alan)$

$C_D = 0.11\ (Aerodinamik\ Direnç\ Katsayısı)$

$A_f * C_D = 0.084$

$V = Taşıt\ Hızı + Rüzgar\ Hızı$

Yarış boyunca hava koşulları nedeniyle rüzgâr esecektir. Ancak rüzgârın hızının ve yönünün tahmin edilmesi zordur. Bu tahmin ancak yarış süresince kullanılacak hava istasyonundan alınan verilerin işlenmesi sonucunda yapılabilir. Bu nedenle şu an için simülasyonda genliği ±8m/s arasında değişen bir rüzgâr etkisi işleme alınmıştır. Bunun için *Band-Limited White Noise* bloğu (Şekil 6.20) kullanılmıştır. Bu şekilde rüzgarın sadece aracın önünden ve arkasından geldiği kabulü yapılmıştır. Yan rüzgar hızı ve açıları bilinmediğinden yan rüzgar ve onun oluşturacağı "yelken etkisi" hesaba katılmamıştır. Rüzgar hızı – zaman grafiğinin integrali alındığında neredeyse hiç rüzgar esmediği durumla karşılaşılmış olunsa da (hakim rüzgar yönü olmadığı öngörüsü yapılmıştır.), rüzgarla birlikte aracın ihtiyaç duyduğu gücün ve dolayısı ile akımın değişmesi neticesinde akülerde depolanan enerjinin harcanmasında az da olsa değişiklik olduğu görülmüştür. Bu şekilde gerçek duruma yaklaşım sağlanmaya çalışılmıştır.



Şekil 6.20 Rüzgar Etkisi ile ilgili Blok

b) Yuvarlanma Direnci Kuvveti

Hareket halindeki bir taşıtın bütün tekerleklerine yoldan yürümeye (yuvarlanmaya) karşı koyan bir direnç gelir. Bunun birincil nedeni histerisizdir. Bu da deforme olabilen bir materyalin karakteristiğinden kaynaklanan deforme olması için gereken enerjinin, eski haline dönerken gerekli enerjiden büyük olması ile alakalıdır. Yük altındaki bir tekerlek tekrar tekrar deforme olup eski haline gelecektir. Bu süreçte histerisizden kaynaklı enerji kaybı ısı olarak dışarı atılacaktır. Histerisiz yuvarlanma direnciyle ilişkilendirilen enerji kaybının başlıca nedenidir. Bu direnç tekerleğe gelen ağırlıkla doğru orantılıdır. Araçta güneş arabaları için özel üretilmiş lastikler kullanıldığından, aracın maruz kaldığı yuvarlanma direnci de düşük olmaktadır. Farklı araçlarda kullanılan lastiklere göre yuvarlanma direncinin değişimi Çizelge 4'te verilmiştir. Yuvarlanma direnci ile ilgili formül ve katsayılar aşağıda verilmiştir.

$$F_r = m * g * C_{rr} * \left(1 + \frac{V}{161}\right) \quad (2)$$

$m = kütle$

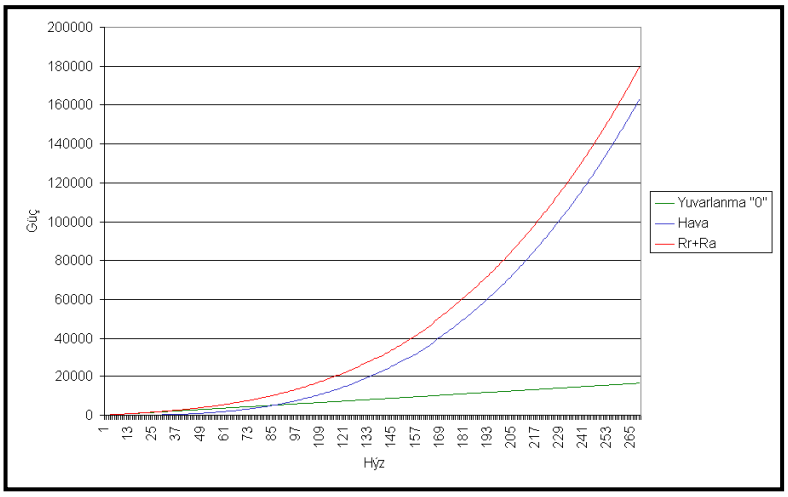
$C_{rr} = Yuvarlanma\ Direnci\ Katsayısı$

$V = Taşıt\ Hızı$

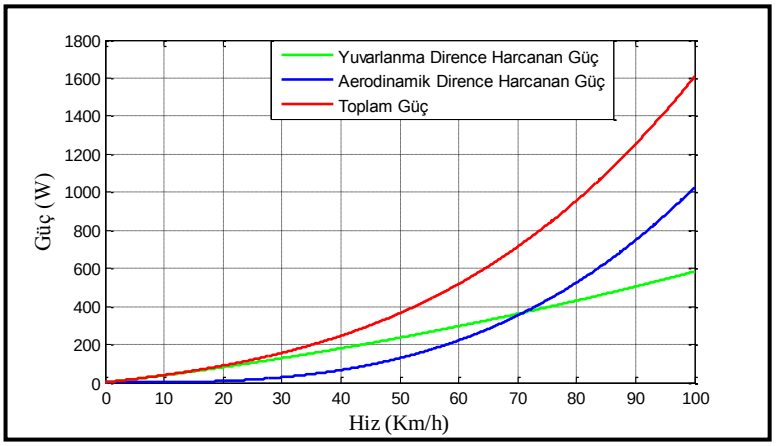
Çizelge 6.5 Farklı Lastiklerin Yuvarlanma Direnç Katsayıları

C_{rr}	Açıklama
0.0002 - 0.0010	Tren Tekerleği
0.0022 - 0.005	Bisiklet Lastiği (20 psi and 50 km/h)
0.0025	Özel Michelin solar car/eco-marathon Lastiği
0.0055	Güneş Arabalarında Kullanılan Tipik BMX Bisiklet Lastiği
0.0062 - 0.015	Araba Lastiği
0.010 - 0.015	Asfaltta Araba Lastiği
0.055 - 0.065	Çimde Araba Lastiği
0.3	Kumda Kar Lastiği

Şekil 6.21 ve şekil 6.22'de bir binek taşıt ile bir güneş arabasının hıza göre güç gereksinimlerinin grafiği verilmiştir. Şekil 6.22'den görülmektedir ki, düşük yuvarlanma direnci ve aerodinamik direnç sayesinde, eğimsiz bir yolda 80 km/h hızda 1 kW güç, seyir için yeterli olmaktadır.



Şekil 6.21 Normal Bir Binek Araçta Düz Yolda Yuvarlanma Direnci İle Aerodinamik Dirençten Kaynaklanan Güç İhtiyacı



Şekil 6.22 Güneş Arabasında Düz Yolda Yuvarlanma Direnci İle Aerodinamik Dirençten Kaynaklanan Güç İhtiyacı

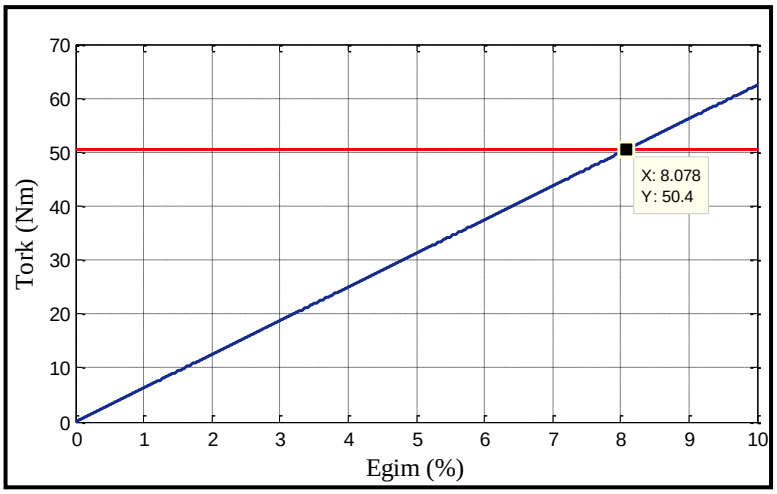
c) Yokuş Direnci Kuvveti

Araç düz bir yolda gitmediği zaman yokuş çıkarken ya da inerken bir kuvvete maruz kalacaktır. Yokuş çıkarken hareket yönünün tersine olan bu kuvvet, yokuş inerken tam ters olarak araca etkimektedir. Yol modelince hesaplanan eğim değerlerine göre yokuş direnci kuvveti hesaplanmaktadır.

$$F_y = m * g * \sin\theta \qquad (3)$$

Yol eğimleri % olarak ifade edilir. Örneğin %5 eğimli bir yol dendiği zaman yolun 100 metrede 5 metre yükseldiği anlaşılmalıdır.

Şekil 623'te güneş arabasının kalkabileceği maksimum yol eğimi grafiği verilmiştir.



Şekil 6.23 Güneş Arabasının Kalkabileceği Maksimum Yol Eğimi Grafiği

d) İvme Direnci Kuvveti

Bir taşıt hareket haline veya herhangi bir hızdan diğer bir hıza geçerken bulunduğu durumun değiştirilmesine karşı bir direnç gösterir. Bu dirence ivme direnci denir. Atalet direncinin bulunması için Newton'un II. atalet prensibinden yararlanılır.

Newton'un II. Atalet Prensibi: Bir cisme etki eden dış kuvvetlerin bileşkesi cisimde meydana gelen hareket miktarı değişimine eşittir.

Araç hızlanırken bir ivme direncine maruz kalır. Burada hesap yapılırken hızın türevi alınarak aracın ivmesi hesaplanır. Gerekli formül aşağıda verilmiştir.

$$F = m * a \quad (4)$$

Araç yavaşlarken de ivme değeri eksi işareti ile beraber yukarıdaki ifadede kullanılırsa, eksi yönde bir kuvvet doğar. Bu durum da taşıtın yine mevut hareket durumumu korumak istediğini, yani hızlanmışken yavaşlamak istemediğini gösterir. İvme direnci, hesaplarda bu sebeple, ivme pozitifken de negatifken de kullanılarak, taşıt yük modelinin, ivmeye bağlı kısmı temsil edilmiş olur.

e) Diğer Dirençler

Diğer dirençler olarak adlandırılan dirençler:

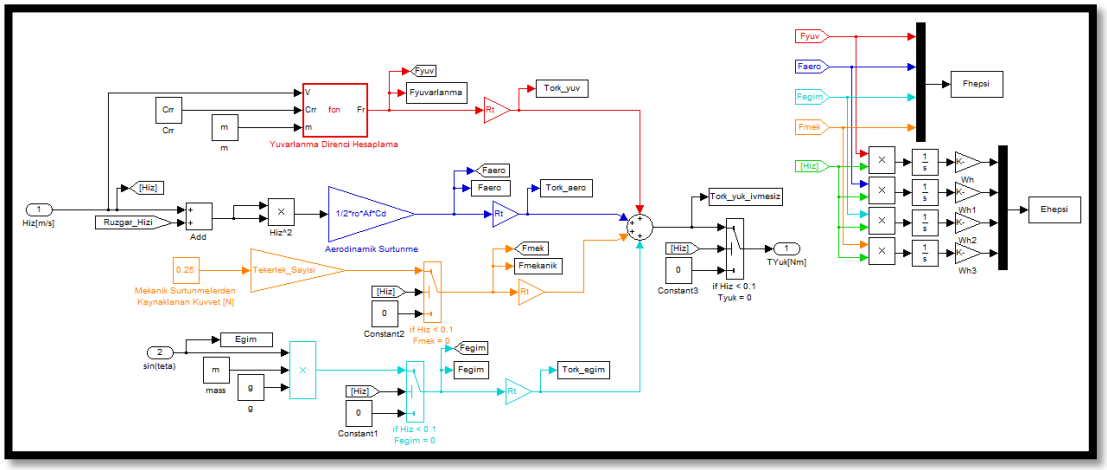
1. Fren sisteminde disk ile balata arasında oluşan dirençler
2. Rulman yataklarda oluşan sürtünmeler
3. Tekerlek açılarından başlıca negatif yönde verişmiş toe-in açılarından kaynaklanan tekerlek dirençleri

4. Dönemeç (viraj) dirençleri. Dönemeç hareketinde tekerlek yan kuvvetlerinin taşıt uzunlamasına eksenine paralel ve seyir yönüne ters yöndeki bileşenlerinden doğan bir viraj direnci söz konusu olur. Bol dönemeçli yollarda seyir dirençleri arasında dikkate değer bir büyüklüğe ulaşabilir.

Rulmanlarda oluşan sürtünmeler viskoz tekerlek sürtünmesi olarak motor modelinde modellendiğinden, bu kısımda sadece fren sisteminden kaynaklı dirençler göz önüne alınmıştır. Bu tür dirençler yuvarlanma direncinin %5i mertebelerinde olduğundan bu değere yakın bir değer sabit olarak simülasyona eklenmiştir.

Taşıt, yukarıda bahsedilen bu direnç kuvvetlerinin etkisinde hareketini sürdürmektedir. Bu nedenle bu kuvvetler toplanır. Bu toplam kuvvet motora yük olarak geri döndürülmelidir. Bunu yapmak için toplam kuvvetler, motor arka tekerleğin ortasında olduğu için tekerlek yarıçapı ile çarpılırlar. Böylece gerekli motor döndürme momenti (motor torku) elde edilmiş olur.

Şekil 6.24'te yük modelinin bütününün Simulink modeli verilmiştir.



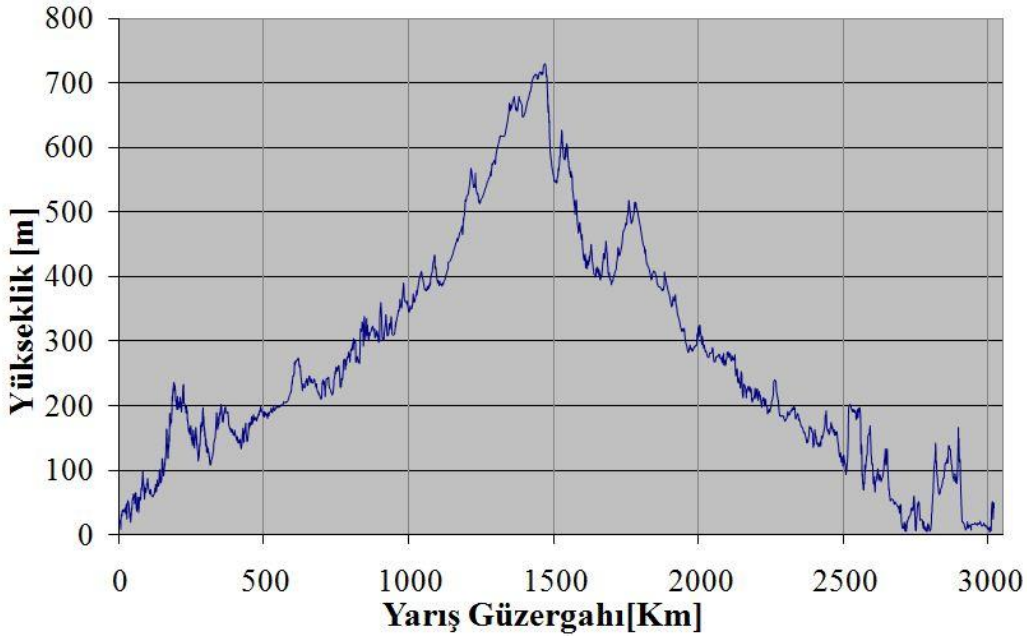
Şekil 6.24 Yük Modeli

6.2.2 Yol Modeli

Yol modeli, World Solar Challenge yarış güzergâhının modellenmesini içermektedir. Toplamda 3021km'lik yarış güzergâhı boyunca yola bağlı yükseklik değerlerinin olduğu bir veri kümesine ihtiyaç vardır. Bu değerler daha önce yarış komitesi tarafından ölçülen değerler olup, WSC iletişim grubundan alınmıştır [17]. 3021 Km'lik yarış güzergâhı üzerinde alınmış 4250 noktadaki yükseklik değerlerine göre işlem yapılmıştır. Bu da ortalama 750m de bir ölçüm alınması anlamına gelmektedir.

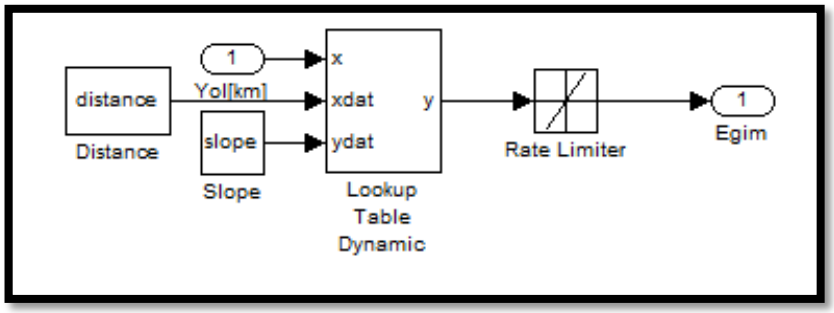
Çözünürlüğü çok iyi olmasa da bu veriler ile daha önce hazırlanan (10 km'de bir nokta) yol modellerine göre çok daha iyi sonuçlar alınacağı açıktır.

Yarış güzergâhı boyunca yüksekliğin değişimini gösteren grafik şekil 6.25'te verilmiştir.



Şekil 6.25 Yol Boyunca Yükseklik Değişimi

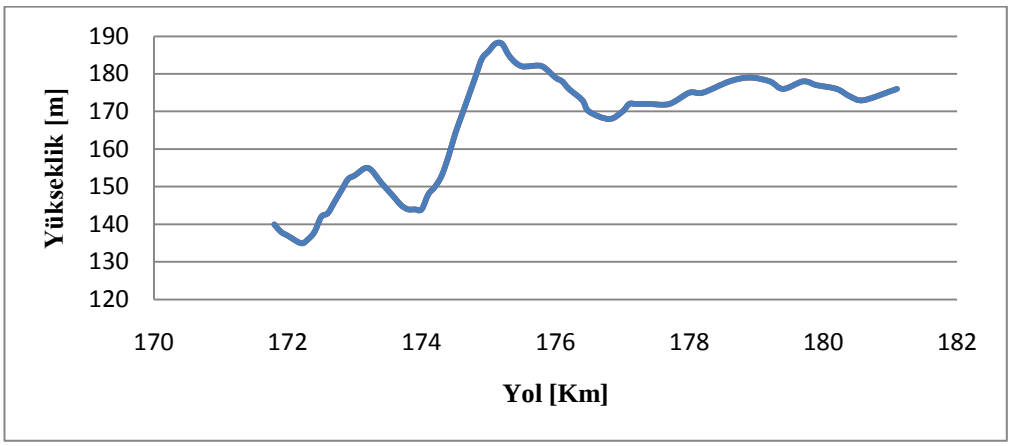
Yol modelinde Km'ye göre yükseklik bilgisine sahip olunduğu için öncelikle her mesafeye karşılık gelen eğim açıları hesaplanmıştır. Bu değerleri simülasyona entegre edebilmek için "look-up table" bloğu kullanılmıştır. Burada uzaklık ve eğim bilgileri birer dosya olarak saklanmaktadır. Buna göre simülasyonda hesaplanan yol verisine karşılık gelen eğim bilgisi çıkış olarak verilmektedir. İlgili simulink modeli şekil 6.26'da verilmiştir.



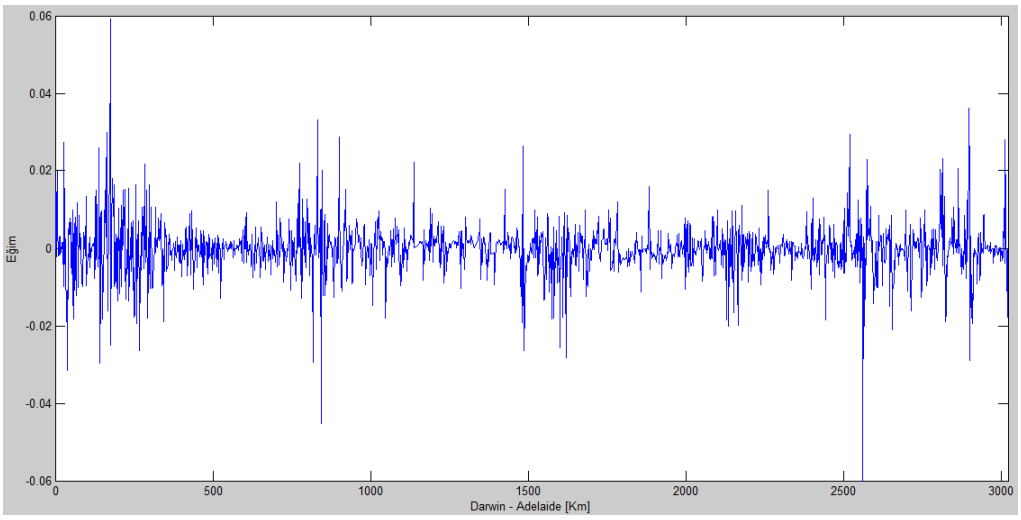
Şekil 6.26 Yol Modeli

Şekil 6.27'de güzergah boyunca en dik yokuşun olduğu 10 kilometrelik bir kısımdaki yükseklik değişimi verilmiştir. Bununla birlikte şekil 6.28'de verilen grafiğe de bakılacak olunursa, yol boyunca taşıtın karşılaşacağı eğimler görülebilir. Aynı

zamanda yine aynı grafikten maksimum %6'lık bir eğimle karşılaşacağı da görülmektedir.



Şekil 6.27 On Kmlik Bir Kısımda Yükseklik Değişimi



Şekil 6.28 Modellenen Eğimin Çıkış Grafiği

6.2.3 Göze Modeli

Göze modeli, araçta kullandığımız silikon güneş gözelerinin gün içerisinde yarış boyunca değişen çıkış değerlerini hesaplamak için oluşturulmuştur. Model, güneşin geliş açısı ve sıcaklıkla değişkenlerine göre şekillenen göze akımı, göze gücü ve göze enerjisi değerlerini hesaplamaktadır.

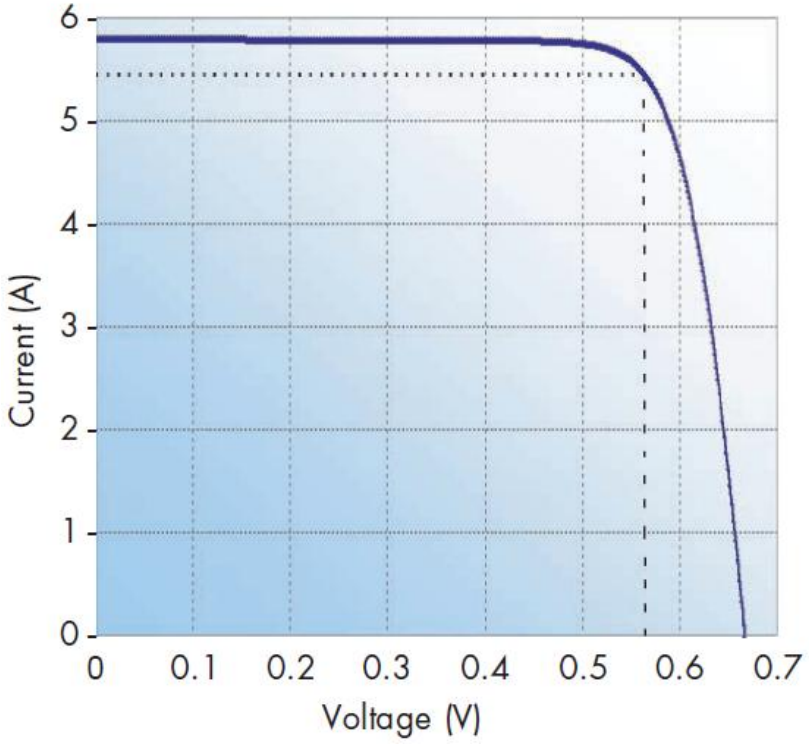
Güneş gözesi verimi, göze üzerine düşen ışınımın ne kadarını güce dönüştürebildiğini göstermektedir. Bu ışınım değeri bölgesel, mevsimsel ve günün saatine bağlı olarak değişmektedir. Şekil 6.30'da Türkiye'deki aylara göre ortalama radyasyon miktarının, şekil 6.31'de ise aylara göre güneşlenme sürelerinin grafikleri verilmiştir. Buna göre haziran ayında ortalama güneş ışınımı Türkiye'de 600W/m^2

olmaktadır [18]. Bu kullanılan güneş gözesi verimi ile çarpıldığında metrekareden 600*0.22=132W güç elde edilebileceği görülmektedir.

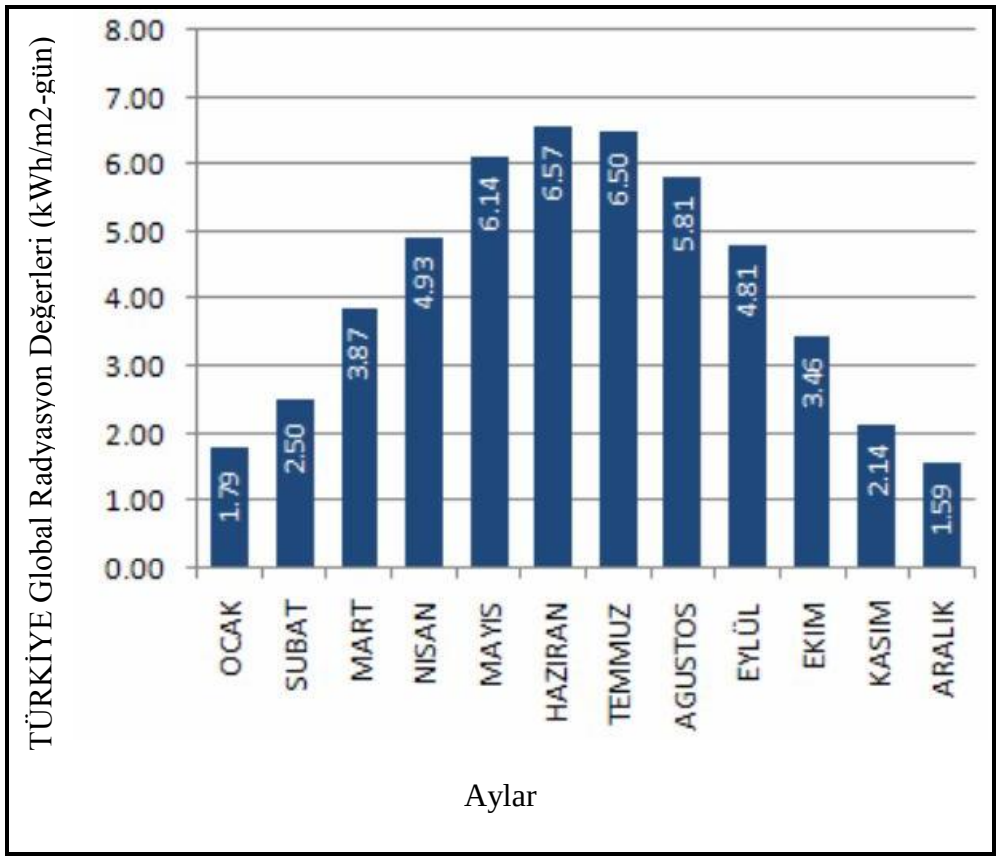
Çizelge 6.6'da simülasyonda kullanılan gözenin karakteristik özellikleri ve şekil 6.29'da kullanılan gözenin I-V karakteristiği verilmiştir.

Çizelge 6.6 Kullanılan Gözenin Karakteristik Özellikleri [19]

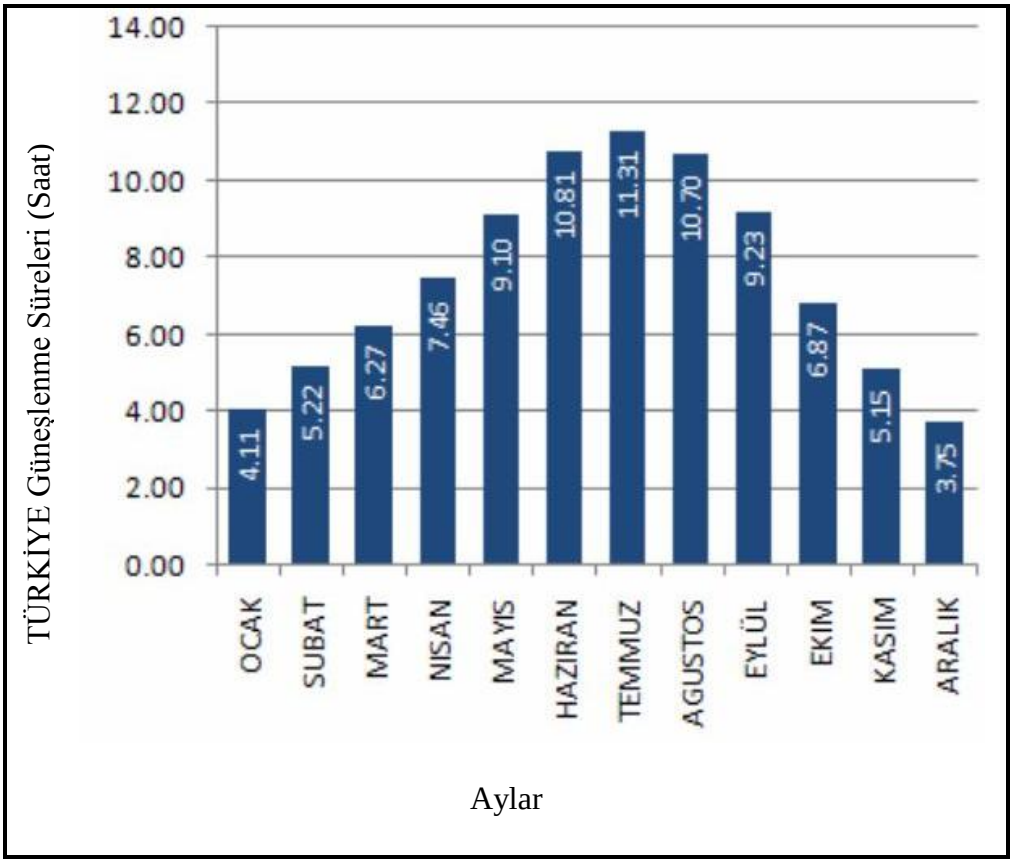
Standart Test Koşullarında Gözenin Elektriksel Karakteristiği Standart Test Koşulları: Işınım 1000W/m2 Göze Sıcaklığı 25ºC	
Açık Devre Gerilimi	0.670 V
Kısa Devre Akımı	5.9 A
Maksimum Güçteki Gerilimi	0.560 V
Maksimum Güçteki Akımı	5.54 A
Çıkış Gücü	3.35 W
Verimi	22.5 %
Sıcaklık Katsayıları	
Gerilim	-1.9 mV / ºC
Güç	-0.38 % / ºC



Şekil 6.29 Güneş Gözesi I-V Karakteristiği

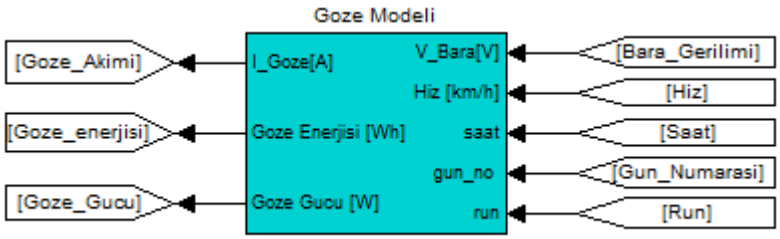


Şekil 6.30 Türkiye Global Radyasyon Değerlerinin Aylara Göre Değişimi



Şekil 6.31 Türkiye'de Aylara Göre Ortalama Güneşlenme Süreleri

Göze modelinin içyapısını anlatmadan önce girişlerini ve çıkışlarını anlatmak doğru olacaktır. Şekil 6.32'de göze modelinin yapısını gösteren Simulink bloğu gözükmektedir.



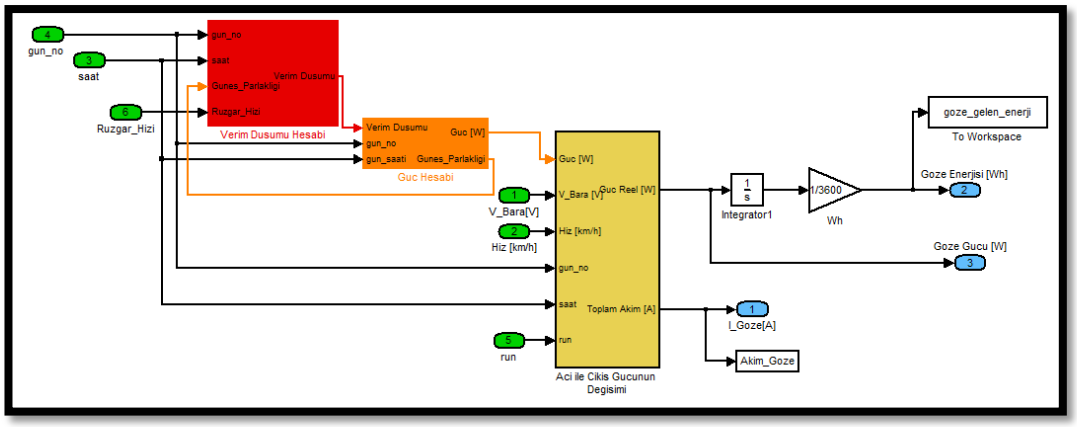
Şekil 6.32 Göze Modeli

Model bu hesapları yapabilmek için şu değerlere ihtiyaç duymaktadır.

1. Bara Gerilimi
2. Hız
3. Saat
4. Gün Numarası
5. Run (Taşıtı harekete geçiren komut)

Göze modeli kendi içerisinde 3 ayrı bloktan oluşmaktadır. Şekil 6.33'de verilen bu bloklar sırasıyla şöyledir.

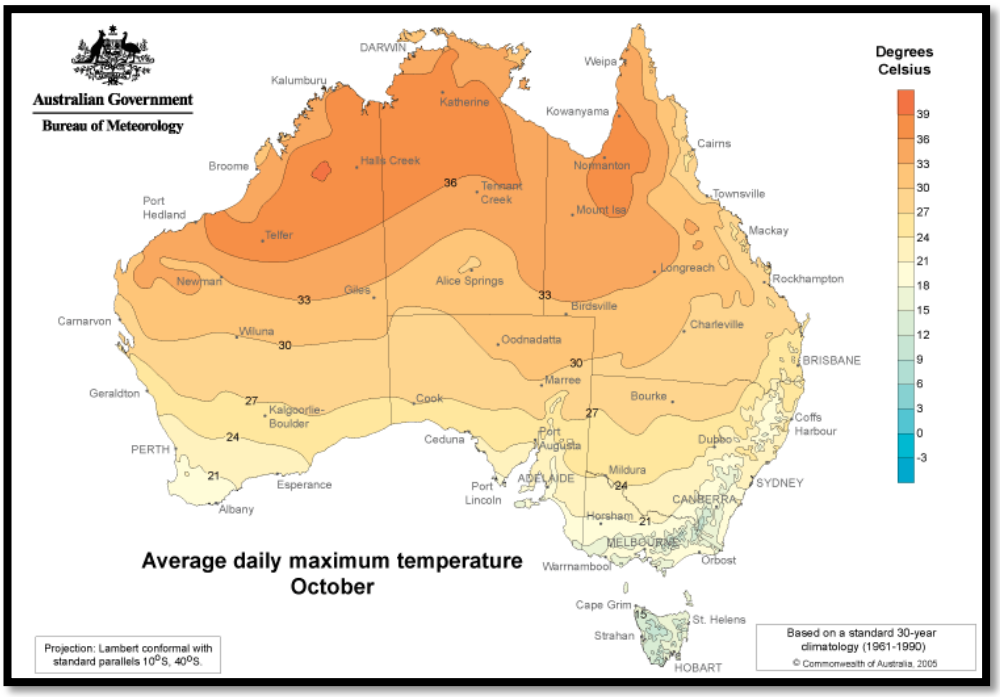
1. Verim Düşümü Hesabı
2. W/m^2 Cinsinden Güç Hesabı
3. MPPT Çıkışlarındaki Akımlar Ve Toplam Akım Hesabı



Şekil 6.33 Göze Modelinin Parçaları

6.2.3.1 Verim Düşümü Hesabı

Güneş gözelerinin verimleri sıcaklıkla düşmektedir. Bu nedenle gün içerisindeki sıcaklık değişimleri hesaplamalarda göz önüne alınmıştır. Avustralya kıtasının ekim ayı ortalama sıcaklık değerleri şekil 6.34'te verilmiştir.



Şekil 6.34 Avustralya Kıtasında Ekim Ayındaki Sıcaklık Dağılımı

Yukarıdaki resimden de kolayca görüleceği üzere yarış rotasında en yüksek sıcaklık 36^0dir. Sabah gün doğumu sırasında sıcaklıklar yaklaşık 15^0 civarında olmaktadır. Sıcaklık değişiminin sabahtan öğlene ve öğlenden akşama doğru lineer olarak arttığı öngörüsü ile günlük hava sıcaklığı değişimi hesaplanmaktadır.

Ancak güneş panelleri ortam sıcaklığı ile aynı sıcaklığa sahip olmamaktadırlar. Gözeler üzerlerine düşen ışığın tamamını elektrik enerjisine çeviremezler. Çeviremedikleri bu ışığın bir kısmı yansırken bir kısmı da ısı enerjisi olarak ortaya çıkar. Bu ısı enerjisi de gözelerin ısınmasına neden olur. Bu nedenle de gözeler ortamdan daha sıcaktırlar. Bu nedenle Aurora takımının bir üyesi tarafından hazırlanmış doktora tezindeki yaklaşım ile gerçeğe daha yakın bir sonuç alınmaya çalışılmıştır [7]. İlgili formüller aşağıda verilmiştir.

$$T_p = T_A + \theta_I * (1 + \theta_{TA} * T_A) * (1 - \theta_w * w) * I \qquad (5)$$

$T_A = çevre\ sıcaklığı$

$w = rüzgar\ hızı$

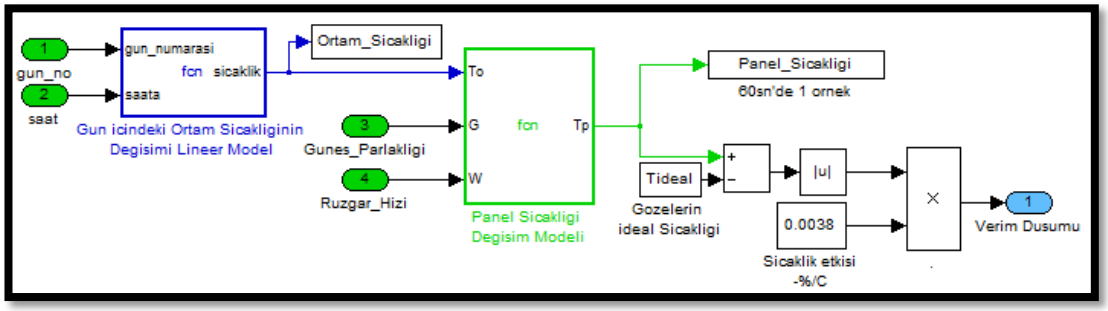
$I = güneş\ parlaklığı$

$\theta_I = 0.0138$,

$\theta_{TA} = 0.031$,

$\theta_w = 0.042$

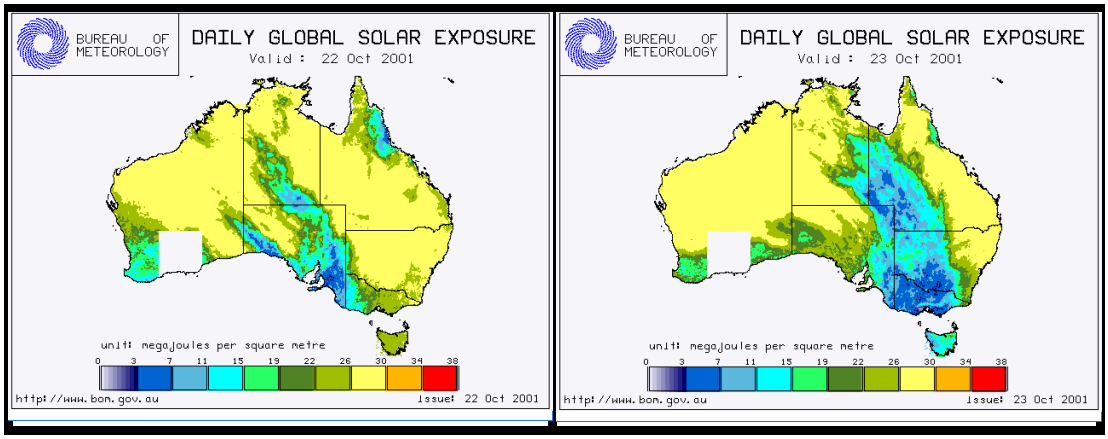
Sıcaklık ile verim düşümü hesabının yapıldığı Simulink bloğu aşağıda verilmiştir.

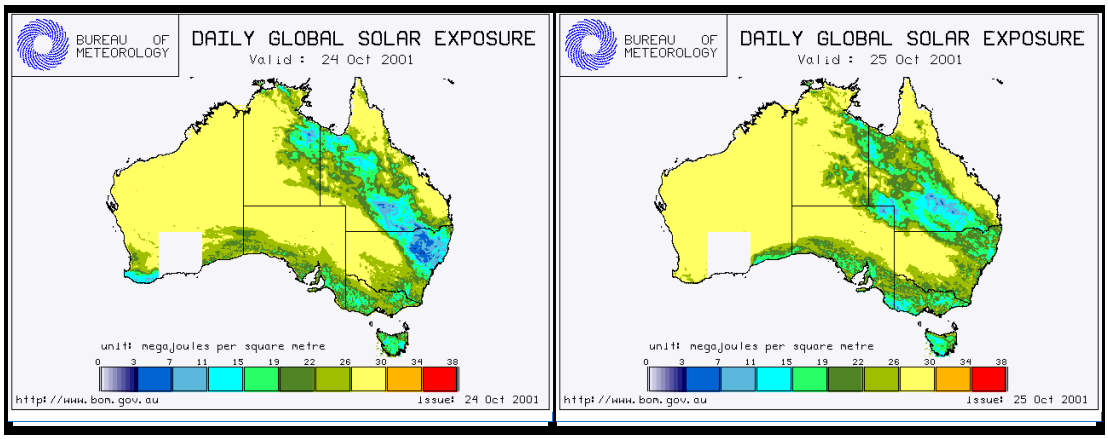


Şekil 6.35 Verim Düşümü Hesap Bloğu

6.2.3.2 W/m^2 Cinsinden Güç Hesabı

Güneş gözelerinin veriminden bahsederken, 1 m^2 güneş gözesinden alınan gücün metrekareye düşen güneş ışığı radyasyon miktarına oranı anlaşılmaktadır. Göze veri yaprağında (datasheet) verilen standart test koşullarına göre 1000W/m2 değerinde %22 verimli güneş gözesinin 1 m2sinden alınabilecek maksimum güç 220W olmaktadır. Güneş gözelerinden elde edilecek gücün hesabı yapılırken güneşten gelen ışık enerjisi yoğunluğu çok önemlidir. Bu nedenle öncelikle günün saatlerine göre güneşten gelen enerjinin yoğunluğunun nasıl değiştiği hesaplanmalıdır. Bu hesabın gerçeğe yakınlığı yapılan testlere ve alınan verilerin doğruluğuna çok bağlıdır. Bu değer meteorolojik olaylardan çok etkilenmektedir. Bu nedenle de yapılan hesaplar bir yaklaşımdan daha ileri gidememektedir. Aşağıdaki grafiklerde hava olayları sonucu günlük farklılıkların nasıl olduğu görülmektedir.



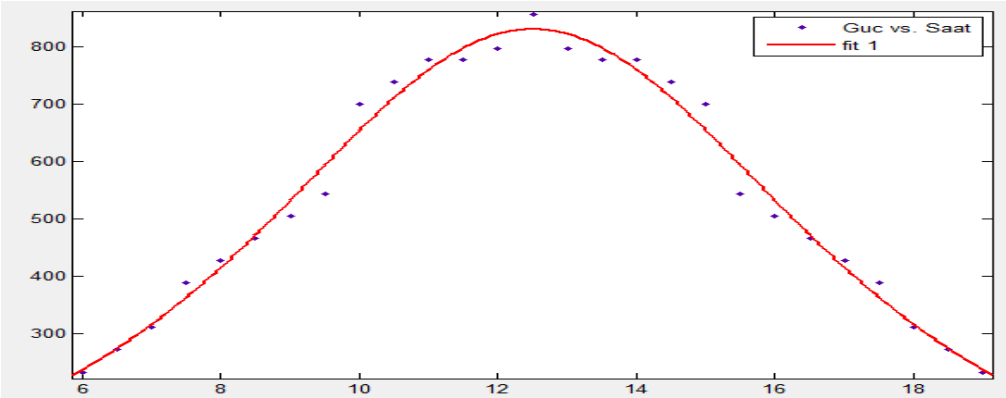


Şekil 6.36 4 Gün Boyunca Bulutluluk Değişimi

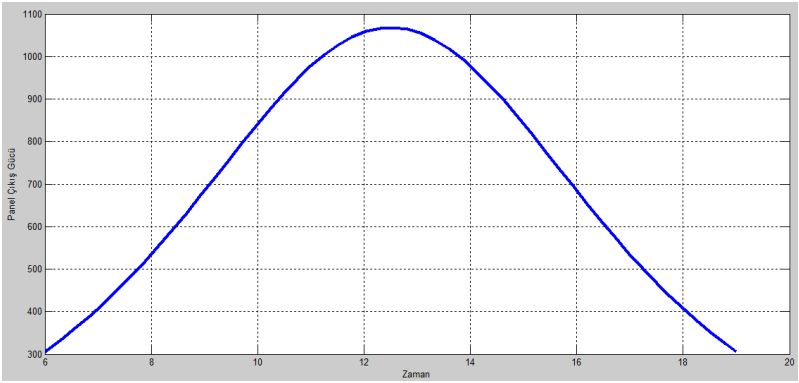
Çizelge 6.7 Bir Haftalık Zaman Diliminde 6 Farklı İstasyondaki Günlük Maksimum Güneş Parlaklığı

Tarih	**19 Ekim**	**20 Ekim**	**21 Ekim**	**22 Ekim**	**23 Ekim**	**24 Ekim**	**25 Ekim**	**Ortalama**
Konum	MJ/m²	MJ/m²	MJ/m²	MJ/m²	MJ/m²	MJ/m²	MJ/m²	MJ/m²
Darwin Airport	16	24	28	28	28	27	28	25,57
Tennant Creek Airport	30	30	30	28	28	20	29	27,86
Territory Grape Farm	29	29	28	18	23	28	20	25
Alice Springs Airport	29	29	27	11	29	29	26	25,71
Roseworthy	18	26	25	6	16	19	22	18,86
Adelaide Airport	20	25	26	4	20	19	22	19,43

Hava hareketlerinden kaynaklanan bu değişmelerin öngörülebilirliğinin çok yüksek olmaması nedeniyle, Ekim 2011'de yapılacak yarış için yapılan bu hesaplarda öncelikle 2009 yılındaki yarış tecrübelerden yararlanılmıştır. Yarış boyunca tutulan kayıtlar ve notlara göre saat saat belirlenen güç değerleri kullanılarak enerjinin saatlik değişimi için bir eğri uydurulmuştur. Bu eğri Şekil 6.37'de verilmiştir. Şekil 6.37'de gösterilen eğri uydurma aracı ile bulunan fonksiyonun kullanılması ile elde edilen günün saatlerine göre değişen göze gücü değerleri şekil 6.38'de verilmiştir.

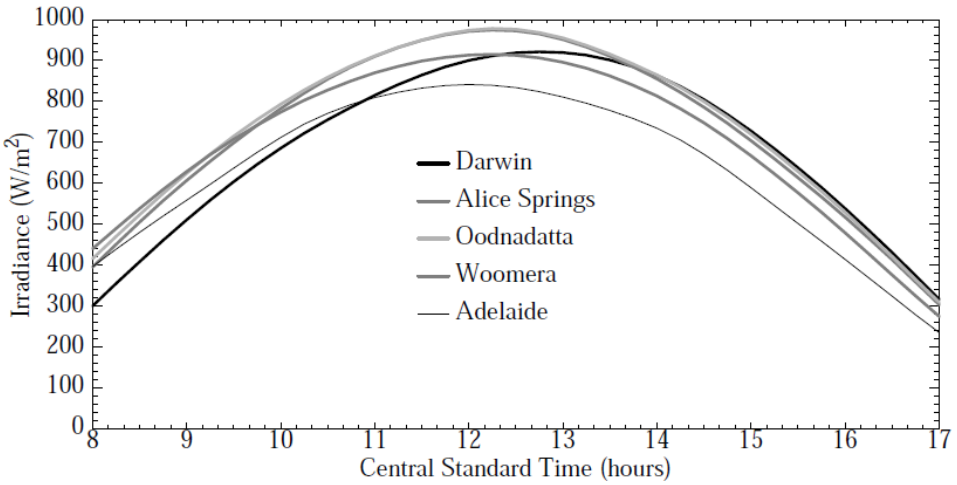


Şekil 6.37 Uydurulan Eğri



Şekil 6.38 Sıcaklık Ve Açıdan Bağımsız Panel Çıkış Gücünün Gün İçindeki Değişim Grafiği

Ancak daha önce bahsedilen doktora tezinde verilen güneş parlaklığı eğrisi baz alınarak saate göre alınabilecek W/m2 cinsinden ışık parlaklığı değerleri 5 farklı noktaya göre çıkarılmıştır [7]. Aşağıda verilen grafik üzerinden okuma yapılarak her bir eğri için Matlab'da eğri uydurularak belli km'ler arasında bu eğrinin kullanılması sağlanmıştır.

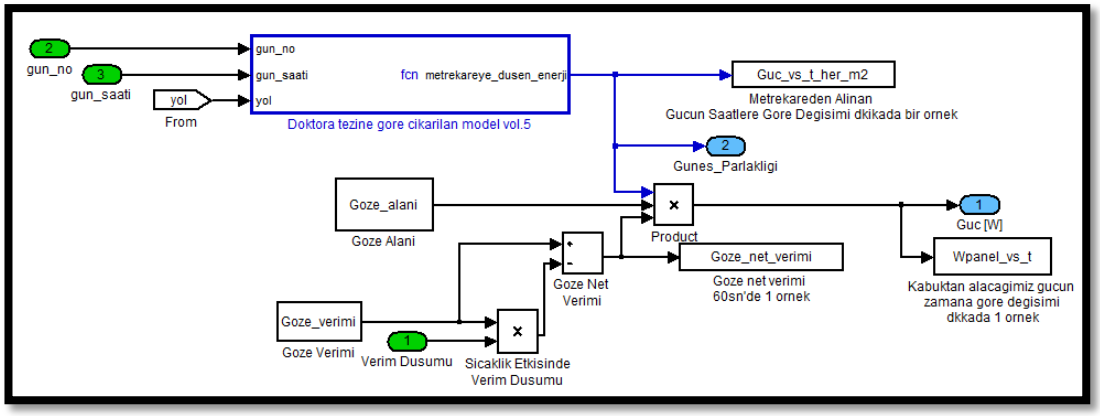


Şekil 6.39 5 Farklı Konumdaki Güneş Parlaklıklarının Zamana Göre Değişimi [7]

Elde edilen 5 farklı ışınım eğrisi Çizelge 6.8'de belirtilen kilometre aralıklarında kullanılmıştır. Güç hesabı Simulink modeli şekil 6.40'da verilmiştir.

Çizelge 6.8 Güneş Parlaklığı Eğrilerinin Kullanıldığı Km Aralıkları

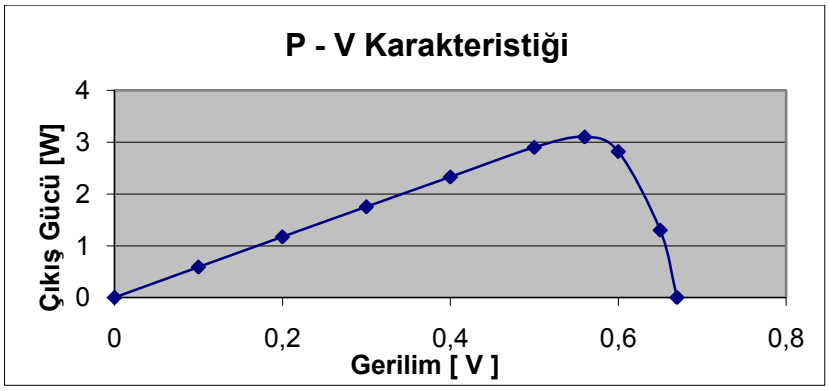
Eğri İsmi	Kullanıldığı Km Aralığı
Darwin	0 – 990
Alice Springs	990 – 1770
Oodnadatta	1770 – 2440
Woomera	2440 – 2720
Adelaide	2720 – 3021



Şekil 6.40 Güç Hesabı Simulink Modeli

6.2.3.3 MPPT Çıkışlarındaki Toplam Akım Hesabı

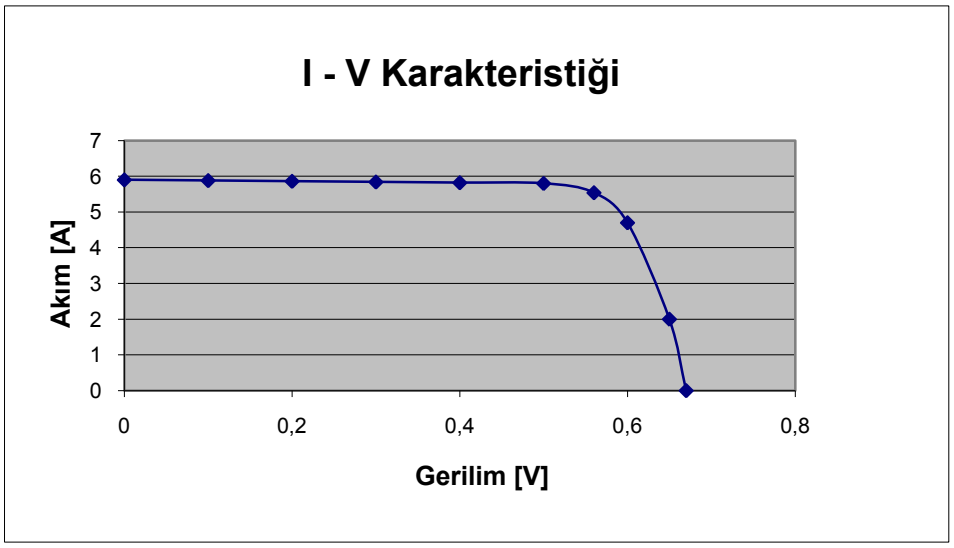
Bir önceki bölümde hesaplanan panel gücü kullanılarak, her bir MPPT'nin çıkış akımlarının hesaplanması gerekmektedir. Bunun için öncelikle panel gücü toplam göze sayısına bölünerek tek bir gözenin gücü hesaplanmaktadır. Çıkış gücü bilinen gözenin P – V karakteristiği kullanılarak, bu güç değeri için gözenin uç gerilimi hesaplanabilir. Bu hesap için göze veri yaprağından [19] (datasheet) alınan veriler doğrultusunda matlabta bir eğri uydurulmuştur. P – V karakteristik grafiği ve oluşturulan eğrinin formülü aşağıda verilmiştir.



Şekil 6.41 Güneş Gözesinin P - V Karakteristik Grafiği

$$V = a_0 + a_1 cos(Pw) + b_1 sin(Pw) + a_2 cos(2Pw) + b_2 sin(2Pw) \quad (6)$$

Uç gerilimi bilenen gözenin, akım gerilim karakteristiği kullanılarak çıkış akımı hesaplanabilir. Bu sayede güneşin geliş açısından bağımsız olarak ancak sıcaklığın etkisinde oluşacak verim düşümünü kapsayan bir göze çıkış akımı elde edilmiş olur. Güneş gözesine ait I – V karakteristik grafiği ve uydurulan eğrinin denklemi aşağıda verilmiştir.



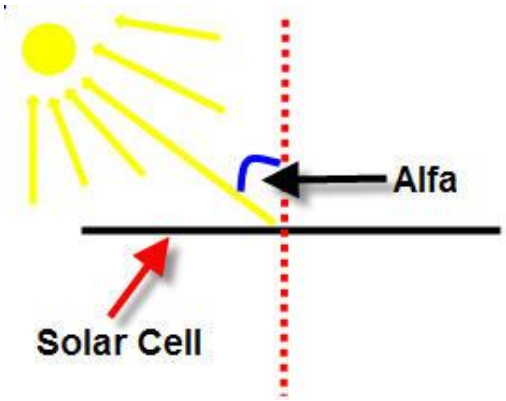
Şekil 6.42 Güneş Gözesinin I - V Karakteristik Grafiği

$$I = a * e^{b*V} + c * e^{d*V} \quad (7)$$

Bu noktadan sonra artık güneş gözesinin güneşin geliş açısına göre nasıl etkilendiğini incelemek ve bunu sisteme entegre etmek gerekmektedir. Bilindiği üzere silikon güneş gözeleri görünür ışık ile çalışmaktadır. Bununla birlikte güneş ışınlarının geliş açısından oldukça etkilenmektedirler. Şekil 6.43'ten de görülebileceği üzere güneş ışınlarının, güneş gözelerine dik olan hayali bir eksenle yaptığı açıya alfa açısı

denilirse, bu açının değişimi ile güneş gözesinin çıkış akımı arasında şöyle bir bağıntı olduğu söylenebilir.

$$I_{Reel} = I_{Max} * Cos\alpha \quad (8)$$



Şekil 6.43 Göze Düzlemi ve Güneşin Geliş Açısı

Güneş gözelerinin açıyla değişimi üzerine yazılmış birçok makale ve bu nedenle de birçok değişik hesap yöntemi bulunmaktadır. Ancak WSC'09 süresince aldığımız veriler ve tecrübeler ışığında yukarıda verilen formül hesaplarımıza uyum sağlamaktadır.

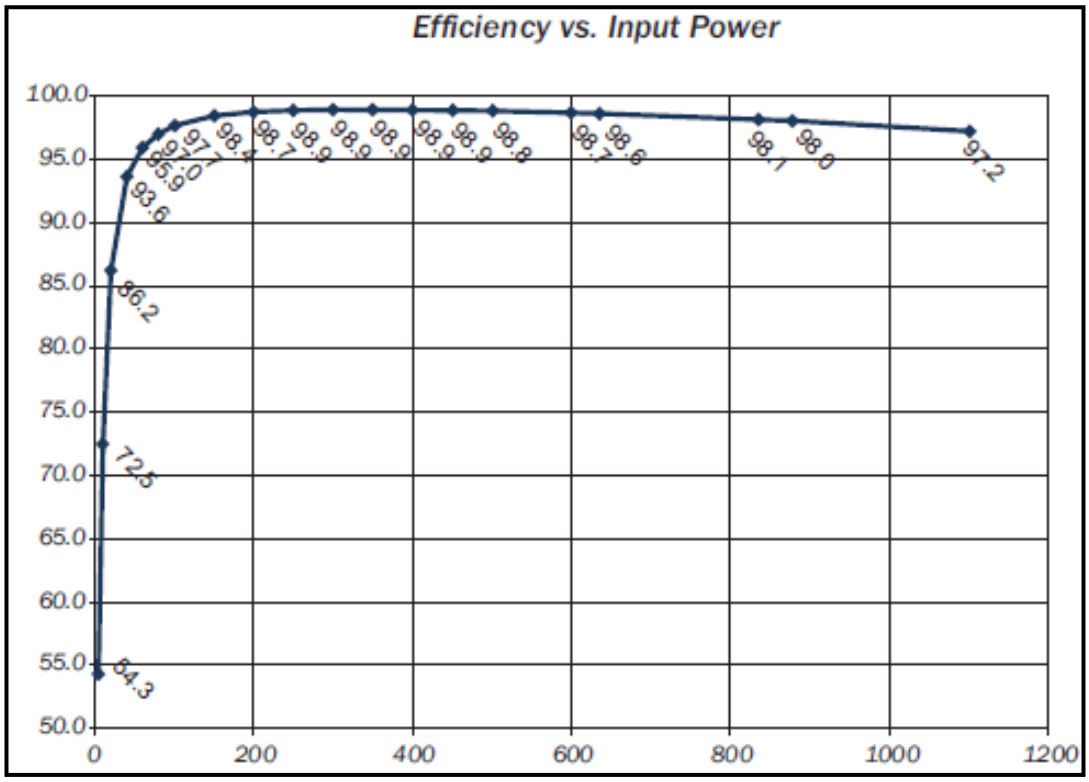
Göze özelliklerinin açıyla değişimini hesaplayabilmek için, öncelikle yarış süresince güneşin geliş açısının nasıl olacağının bilinmesi gerekmektedir. Aşağıdaki Çizelgeda yarış süresince güneşin doğuş ve batış zamanı, doğuş açısı ve öğlen maksimum diklik derecesi görülmektedir. Buna bağlı olarak gün doğumu ve gün batımı ile öğlenki güneş açısı arasındaki değişimler eşittir. Hesaplamalarda güneş ışınlarının açısının lineer olarak değiştiği kabulü yapılmıştır.

Date	Astronomical Twilight		Nautical Twilight		Civil Twilight		Sunrise	Sunset	Azimuth		Length of day		Solar noon		
	starts	ends	starts	ends	starts	ends			Sunrise	Sunset	This day	Difference	Time	Altitude	Distance (10^6 km)
25 Eki 2009	05:04	19:58	05:29	19:32	05:55	19:07	06:17	18:45	103°→	257°←	12h 28m 39s	+ 39s	12:31	89,6°	148,755
26 Eki 2009	05:03	19:58	05:29	19:33	05:54	19:07	06:16	18:45	103°→	257°←	12h 29m 18s	+ 39s	12:31	90,0°	148,714
27 Eki 2009	05:03	19:59	05:28	19:33	05:54	19:07	06:16	18:46	103°→	257°←	12h 29m 57s	+ 38s	12:31	89,7°	148,673
28 Eki 2009	05:02	19:59	05:28	19:33	05:53	19:08	06:15	18:46	104°→	256°←	12h 30m 36s	+ 38s	12:30	89,3°	148,632
29 Eki 2009	05:02	19:59	05:27	19:34	05:53	19:08	06:15	18:46	104°→	256°←	12h 31m 14s	+ 38s	12:30	89,0°	148,591
30 Eki 2009	05:01	20:00	05:27	19:34	05:53	19:08	06:14	18:46	104°→	256°←	12h 31m 52s	+ 38s	12:30	88,7°	148,551
31 Eki 2009	05:01	20:00	05:27	19:34	05:52	19:09	06:14	18:47	105°→	255°←	12h 32m 30s	+ 37s	12:30	88,3°	148,511

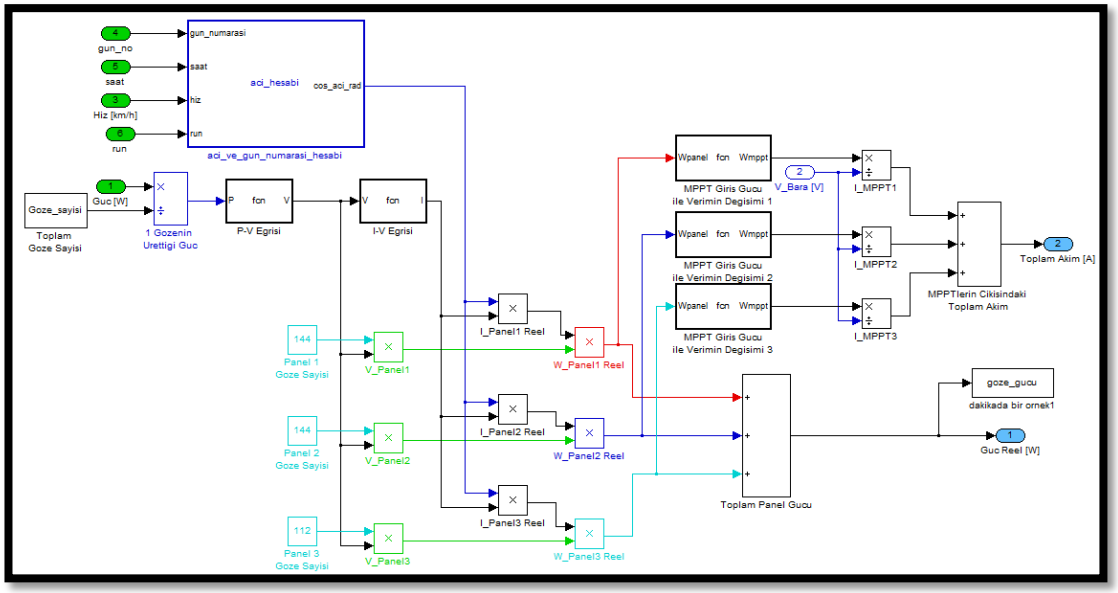
Şekil 6.44 Yarış Süresince Güneş Işınlarının Geliş Açısı

Bunlara ek olarak yarış süresince kontrol noktalarına gelindiğinde aküler şarj edilmeye devam edilecektir. Kontrol noktalarında güneş gözeleri güneşe çevrilerek dikilebilmektedir. Bu nedenle de simülasyonda araç kontrol noktasına geldiğinde güneş ile yaptığı açı sıfır olacak şekilde ayarlanmıştır.

Güneş ışınlarının geliş açısına göre hesaplanan göze akımı ile daha önce hesaplanan panel gerilimi çarpılarak, sıcaklık ve güneş ışınlarının geliş açısı ile değişen panel gücü hesaplanabilmiştir. Araçta kullanılan Drivetek marka MPPT'lerin verimi giriş gücüne göre değişiklik göstermektedir. Giriş gücüne göre verim değişimini gösteren grafik şekil 6.45'te, ilgili model şekil 6.46'da verilmiştir [20].



Şekil 6.45 MPPT Verimi ile Giriş Gücü Arasındaki Bağıntı



Şekil 6.46 MPPT Çıkış Akımlarını Hesaplayan Model

6.2.4 Akü Modeli

Akü modeli, araçta kullanılan akünün deşarj eğrisini temel alarak aküden çekilen akıma göre akünün gerilim değişikliğini veren modeldir. WSC'11de kullanılacak aküye ilişkin özellikler ve bu özelliklere göre akü gruplandırması aşağıda verilmiştir.

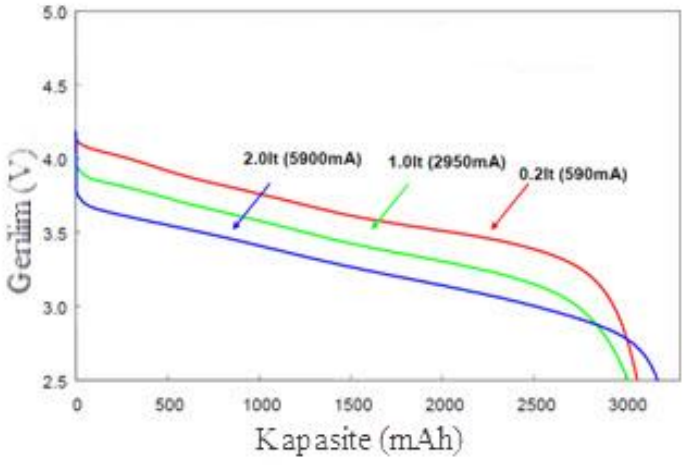
Çizelge 6.9 Kullanılan Akünün Özellikleri [21]

Nominal Gerilim		3,6 V
Nominal Kapasite	Minimum	2950 mAh
	Özgün	3100 mAh
Boyutlar	Çap	18,6 mm
	Yükseklik	65,2 mm
Ağırlık		45,5 g

Çizelge 6.10 Kullanılacak Akünün İzin Verilen Ağırlığa Göre Boyutlandırılması

İzin Verilen Toplam Akü Ağırlığı	21000	g
Bir Akünün Ağırlığı	45,5	g
Kullanılabilecek Maksimum Akü Sayısı	461	adet
Seri Koldaki Akü Sayısı	27	adet
Paralel Koldaki Akü Sayısı	17	adet
Toplam Kullanılan Akü Sayısı	459	adet
Akünün Nominal Gerilimi	3,6	Volt
Nominal Bara Gerilimi	97,2	Volt
Akü Kapasitesi	3,1	Ah
Akülerde Depolanabilecek Toplam Enerji	5122,44	Wh

Kullanılan akünün farklı deşarj akımlarındaki boşalma karakteristiklerine ilişkin grafik şekil 6.47'de verilmiştir. Grafikten de görülmektedir ki, akünün deşarj akımı değiştikçe (arttıkça) akü kapasitesi düşmektedir.



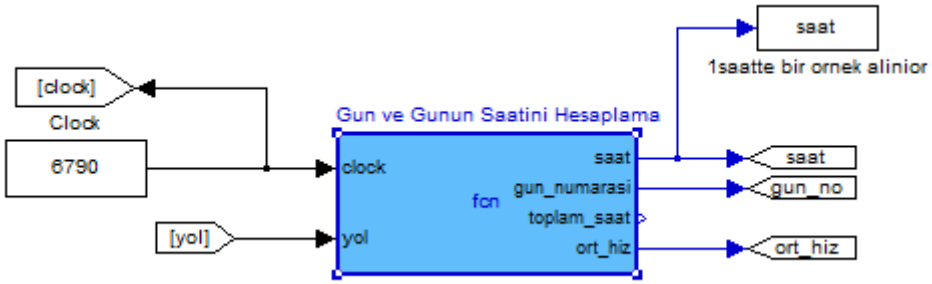
Şekil 6.47 Akü Deşarj Karakteristiği

Akü modeline giren akım bilgisi, akü kutusundan çekilen akıma karşılık gelmektedir. Kurulan sistemde 17 paralel akü olduğu için öncelikle bu akım bilgisi paralel kol sayısına bölünerek tek bir aküden çekilen akım değeri bulunmuştur. Bu işlem yapılırken akülerin özdeş ve iç dolaşım akımlarının sıfır olduğu kabulü yapılmıştır. Daha sonra mAh cinsinden kapasitesi hesaplanarak, yukarıda verilen deşarj eğrisi kullanılarak akünün uç gerilimi hesaplanmıştır.

Bundan sonra seri koldaki akü sayısı ile çarpılarak bara gerilimi hesaplanmıştır. Hesaplanan bu gerilim değeri motoru süren hız kontrolörüne ve MPPTlerdeki çevirme oranı için göze modeline gönderilmektedir. Ayrıca hesaplanan bu gerilim ile akü kutusundan çekilen akım çarpılarak güç, bu değerin integrali alınarak da aküden çekilen enerji hesaplanmaktadır. Bu değer başlangıçta tam dolu olan akü kapasitesinden (5.1 kWh) çıkartılarak aküden kalan enerji bulunmuş olunur.

6.2.5 Gün ve Saat Hesabı

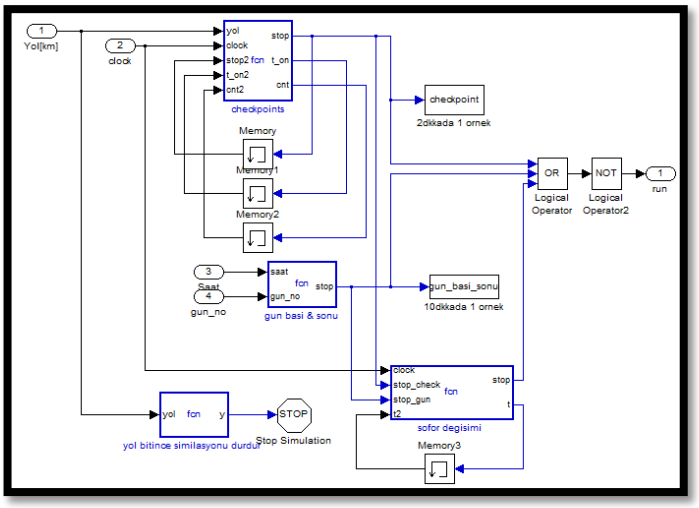
Simülasyona süresine göre gün ve saat hesabı yapan blok aşağıda gösterilmiştir. Öncelikle clock değişkeni saate çevrilmiştir. Sonra bir günün kaç saat sürdüğü bilindiği için geçen toplam süreden kaçıncı günde olunduğu bulunmaktadır. İlgili blok şekil 6.48'de verilmiştir.



Şekil 6.48 Gün ve Saat Hesaplayan Blok

6.2.6 Kontrol Noktası Bekleme Süresi Hesabı

Yarış sırasında toplamda 10 adet kontrol noktasına giriş yapılmaktadır. Bu kontrol noktalarından 7sinde 30 dakika, 3 tanesinde ise 10 dakika beklemek gerekmektedir [22]. Bu nedenle kontrol noktalarına girilen anın hesaplanabilmesi gerekmektedir. Aşağıda araca dur veya ilerle komutunu veren blok bulunmaktadır. Bu blok kontrol noktalarını, yarışta aracın yola devam etme sınırlarını ve gerekirse pilot değişimlerini hesaplamaktadır. İlgili Simulink bloğu şekil 6.49'da verilmiştir.



Şekil 6.49 Araca Dur veya Git Komutunu Veren Blok

7. WSC'DE (WORLD SOLAR CHALLENGE) YARIŞ STRATEJİSİ

7.1 Yarış Stratejisi Nedir?

Yarış stratejisi; bir taşıtın yarış süresince ya da her bir sektördeki koşullarının önceden belirlenmesi ve yarış sırasında güncellenmesi ile sabit bir mesafeyi minimum sürede almayı hedefleyen kararlar bütünü olarak tanımlanabilir.

Güneş arabaları için yarış stratejisi kısaca enerji yönetimi olarak adlandırılabilir. Enerji tüketimi optimizasyonu bir güneş arabası yarışında birincil önceliktir. Bu nedenle, taşıtın enerji parametrelerini sürekli gözlemleyip optimize etmek yarış stratejisi oluşturmak için çok faydalıdır. Yarışlara katılan çoğu takım, değişken koşullar altında, taşıt hızını optimize eden yazılımlar (algoritmalar) kullanmaktadır. Bu programlar sürekli olarak takımı bilgilendirerek taşıtın gitmesi gereken hız değerini (hız referansı) hesaplamaktadırlar. Bazı takımlar telemetri sistemleri kullanarak taşıtın performans verilerini, güneş arabasını takip eden destek aracına göndererek sürücü için gereken optimum stratejiyi elde etmektedirler.

Yarış güzergâhı direkt olarak yarış stratejisini etkilemektedir. Güzergâha göre güneşin konumu gibi birçok etken değişebilmekte, bu da taşıtın performansına etkimektedir. Buna ek olarak, yol boyunca karşılaşılan yokuşlar taşıtın istenilen hızda gitmesi için gereken güç gereksinimini değiştirmektedir. Örneğin 2001 ve 2003 yıllarında North American Solar Challenge yarış rotası bir dağ güzergâhından geçirilmiştir. Rota boyunca yükseklik değişimi aşağıdaki grafikte verilmiştir. [13]



Şekil 7.1 2001 ve 2003 NASC Yarış Rotası

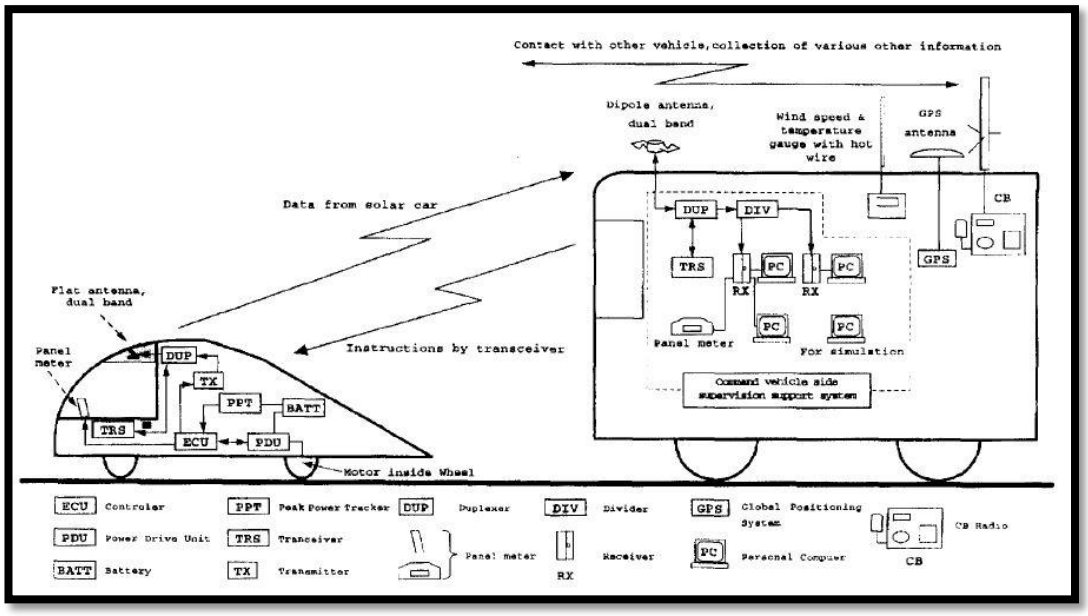
7.2 Strateji Oluşturma

World Solar Challenge yarışı ilk kez 1987 yılında Avustralya kıtasında düzenlenmiştir. İlk zamanlar 3 yılda bir düzenlenen yarışın üçüncü seferi olan 1993 yarışında birinci olan Honda Dream Car takımı, kazanmalarının en büyük nedeninin "Hız Stratejisi Destekleme Sistemi" olduğunu söylemektedir [23]. Bu sistemin çalışması için 3 adet gereksinime ihtiyaç duyulmaktadır.

1. Güneş arabasından alınan tüm bilgilerin arkadaki takip aracına gerçek zamanlı aktarılması gerekmektedir.
2. Gerekli komutları verecek olan takip aracının güneş arabasından gelen verileri analiz etmesi ve bu bilgileri kullanarak yüksek verimli ve yüksek ortalama hızlı bir seyir stratejisine karar vermesi gerekmektedir.
3. Taşıt içinde o anki seyir durumunda çalışan hız stratejisi ile tam uyumlu ve sürücüyü beklenmeyen çalışma koşullarına maruz bırakmayacak bir sistem olmalıdır.

Bu ihtiyaçlara bağlı olarak yarış stratejisi belirleme sistemi 3 elemandan oluşur;

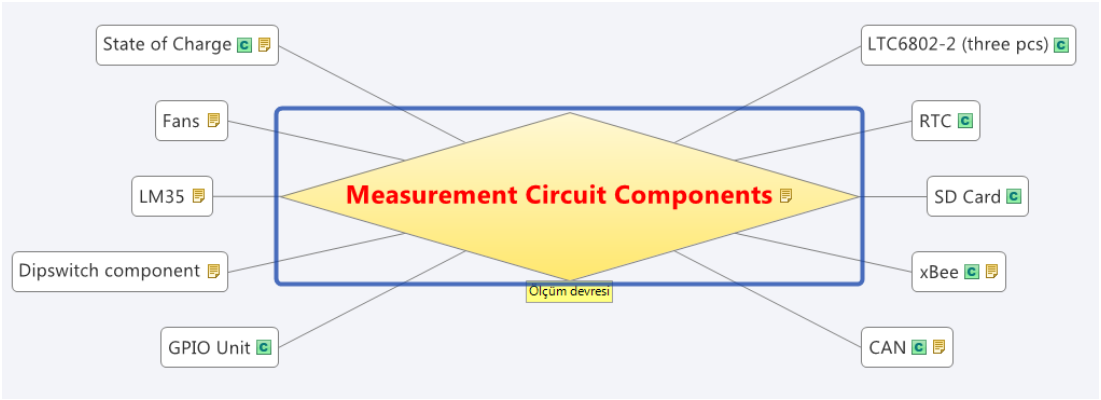
1. Taşıtta gerekli tüm ölçümleri alacak bir ölçüm sistemi
2. Yarış stratejisini belirleyecek bilgisayar destekli bir simülasyon programı
3. Taşıtın içinde, takip aracındaki simülasyon programı ile hesaplanan ve taşıta gönderilen veriyi değerlendirecek bir kontrol algoritması



Şekil 7.2 Honda Dream Car Strateji Oluşturma Sistemi Şeması [23]

7.2.1 Ölçüm Sistemi:

Ölçüm sistemi temel olarak araç üzerinden alınması istenen ve simülasyonda kullanılacak verilerin temini için çalışmaktadır. İTÜ Güneş Arabası Ekibi'nin 5 numaralı aracı olan ARIBA V'in yapısında tek bir ölçüm devresi yoktur. Ölçümler, ölçüm devresine ek olarak farklı işlevlere sahip olan devreler tarafından da alınmaktadır. Tüm devrelerin birleşmesi ile bir ölçüm sistemi oluşturulmuştur. Ölçüm devresinin temel yapısı Şekil 7.3'te verilmiştir.



Şekil 7.3 Ölçüm Devresi Şeması

LM35 : Analog Sıcaklık Sensörü

GPIO : Genel Amaçlı Giriş Çıkış (General Purpose Input Output)

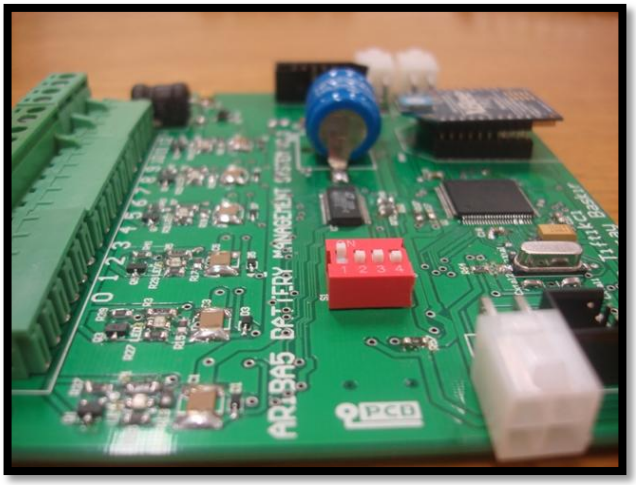
LTC : Pasif Balanslama Yapan Tümdevre (Passive Balancing IC)

RTC : Gerçek Zamanlı Saat (Real Time Clock)

xBee : Zigbee Protokollü RF modem

CAN : Control Area Network

Ölçüm devreleri akü kutusunun içerisinde bulunmakta ve aküler ile ilgili detaylı ölçümler yapmaktadır. Araçta kullanılan seri koldaki her bir akünün gerilimi ve aküde kalan enerji değeri (State of Charge – SOC), akülerin sıcaklık bilgileri ve çekilen akım değeri ölçüm devreleri tarafından ölçülmektedir. 3 parçadan oluşan bu sistem kendi arasında CAN-Bus ile haberleşmekte, araçtaki diğer devrelerle de kablosuz olarak haberleşmektedir.



Şekil 7.4 ARIBA V Batarya Yönetim ve Ölçüm Devresi

Araçtan alınması istenen diğer tüm ölçümler “dashboard devresi” olarak adlandırılan diğer bir devre ve motor sürücüsü tarafından alınmaktadır. Sıcaklık, hız, akım, gerilim, ivme, eğim ve gidilen yol olmak üzere toplamda 65 adet ölçüm alınmakta, bu ölçümlerin hepsi hem araç üzerinde kaydedilmekte, hem de kontrol aracına gönderilmektedir.



Şekil 7.5 Dashboard Devresi

7.2.2 Strateji Simülasyon Yazılımı

Strateji simülasyon yazılımı (kısaca strateji yazılımı) yarış öncesi ve sonrası olmak üzere 2 sürüm olarak düşünülebilir.

- Tamamı off-line verilerle çalışan simülasyon döngüsü
- Gerçek verilerle çalışan simülasyon döngüsü

Yarış öncesinde araç üzerinden alınan anlık veriler olmadığından, program geliştirilen güneş arabasını ve yarış şartlarını simüle eden modeller ile çalışmaktadır. Bu modeller ışığında yarış için farklı stratejiler üretilerek, yarış başlangıcı için araca verilecek referansa karar verilebilir.

Gerçek zamanlı yapılan ölçümleri değerlendirerek hangi hızda gidilmesi gerektiğine karar verebilecek sistem ise, aslında yarışta kullanılacak olan ve yukarıda sözü geçen 2. sürüm olmaktadır. Artık burada yarış öncesi simülasyon için kurulmuş model bileşenleri (güneşten gelen aktüel güç, rüzgar hız vb.), gerçek zamanlı verilerle güncellenmekte, böylece en doğru stratejiye karar verilebilmektedir. Modellenmiş bileşenler (akü, rüzgar, güneş vb.) yerine gerçek ölçümlerin kullanılması, doğru kararların verilmesi için elzemdir.

Strateji simülasyon yazılımının yarış sürümü 2 parçadan oluşmaktadır.

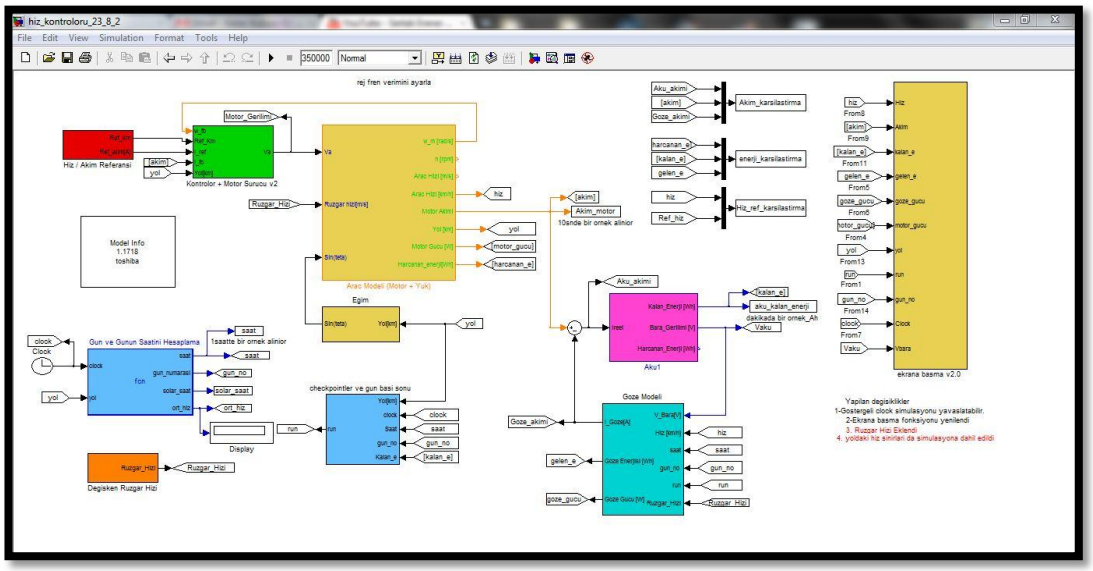
- Kullanıcı arayüzü
- Taşıtı, çevre modellerini ve stratejiyi içeren genel yazılım

Bu parçalardan birincisi C#'ta yazılmış bir kullanıcı arayüzüdür. Bu arayüz ile gelen tüm veriler ve bu verileri kullanılarak yapılan gerekli hesaplamalar stratejiste gösterilmektedir. Bu sayede stratejist konu ile ilgili tüm ölçümlere ve hesaplara her an ulaşabilmektedir.



Şekil 7.6 Yarış Sırasında Strateji Yazılımı Kullanıcı Arayüzünden Alınmış Bir Görüntü

Bu parçalardan ikincisi ise; arayüze gelen verileri ve gerekli hesaplamaları (güç değerleri) alarak Matlab Simulink ortamında hesaplama yapan kısımdır. Matlab Simulink ortamında yapılan optimizasyon simülasyonunun karmaşık olması nedeniyle bu işlem gerçek zamanlı referanslar (hız, akım ya da güç) üretememektedir. Belirli periyotlarla üretilen referanslar stratejiste arayüz tarafından gösterilmekte, stratejistin onaylaması durumunda güneş arabasına komut olarak gönderilmektedir.



Şekil 7.7 Matlab Simulink Modeli

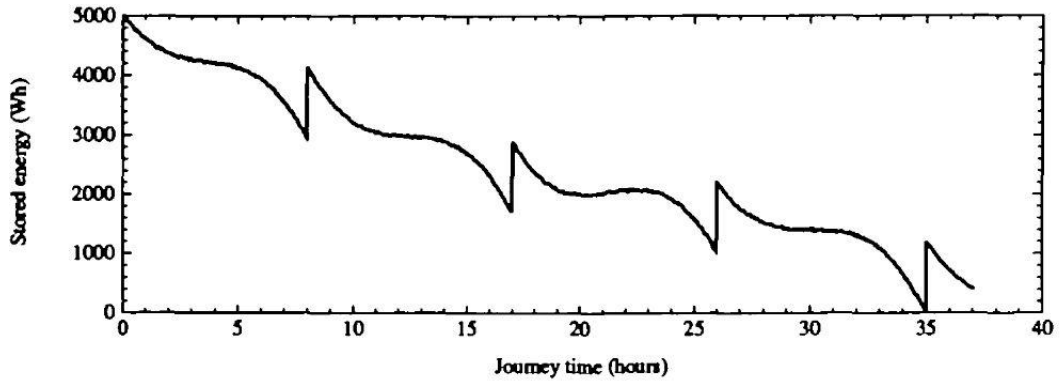
7.2.3 Kontrol Algoritması

Taşıtın içinde, simülasyon programı ile hesaplanan ve taşıta gönderilen komutları değerlendirecek bir kontrol algoritması mevcuttur. Bu kontrol algoritması taşıtın stabil kalarak istenilen koşullarda ilerlemesini sağlamaktadır. Yarış sırasında koşullar sürekli değişeceğinden bu tür bir algoritma çok önemlidir. Koşullar en kötüden en iyiye hızlı bir geçiş yaptığında (öğle saatinde buluttan çıkan güneş ile birlikte negatif yol eğimi gibi) bilgisayar taşıt hızında ani bir artış olmasını isteyecektir. Bu ani artış direkt komut olarak gönderildiğinde taşıt yüksek değerde ivmelenmek isteyecektir. Bu da güneş arabasında istenmeyen şekilde ivme direncini (bir nevi ivmelenme kaybı olarak adlandırılabilir) arttıracaktır. Ayrıca sürücü açısından taşıtın kontrolü de zorlaşacaktır. Bu nedenle bilgisayardan gelen komutları belli koşullara göre işleyerek taşıta etkiten bir kontrol algoritmasına ihtiyaç vardır. Bu şekilde taşıt ister sıfır hızdan istenilen hıza çıkacak ya da ani değişikliklere cevap verecek olsun, bu değişimler önceden stratejist tarafından hesaplanan eğriler üzerinden değişecektir.

7.3 Yarış Stratejisi Neden Gereklidir?

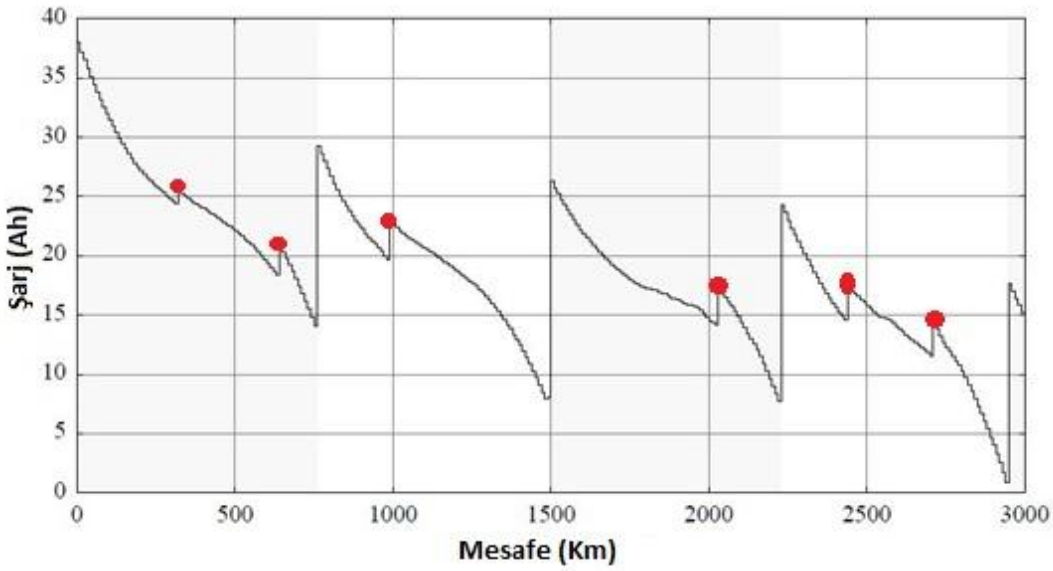
Yarışı kazanmanın altın anahtarlarından biri en iyi stratejiyi oluşturmaktır. Yarışlarda çoğunlukla en iyi araca sahip olan değil, en iyi stratejiyi oluşturan takım birinci olur. Bunun en güzel örneklerinden biri 2008 yılında ülkemizde düzenlenen TÜBİTAK Formula G yarışına iki aracı ile katılan İTÜ Güneş Arabası Ekibi'dir. Ekip iki numaralı aracında (ARIBA II) yaşadığı bir aksaklık nedeniyle otuz turluk yarışın onuncu turundan itibaren yarış sonuna kadar güneşten alabileceği enerjinin yarısını almıştır. Yarış sırasında anlık olarak araçla ilgili tüm bilgilere erişebilen ekip stratejisini ivedilikle güncelleyebilmiştir. Böylelikle diğer araçlarına (İTÜRA) belirli sektörlerde daha hızlı gitmesi, belli sektörlerde de normalden fazla yavaşlaması komutunu vererek rakip takımların, İTÜ Güneş Arabalarının her ikisini de geçmeye çalışarak fazla enerji harcamaları sağlanmıştır. Yarış süresinin sonuna doğru diğer ekipleri geçen ARIBA II adlı araç İTÜRA'nın ardından yarışı ikinci olarak tamamlamıştır. Bu durum yarış stratejisinin önemini açıkça göstermektedir.

World Solar Challenge için de sürekli güncellenecek bir yarış stratejisine ihtiyaç vardır. WSC, çok uzun soluklu bir yarış olduğundan, hava koşulları gün içerisinde bile değişebilmektedir. Parçalı bulutlu bir havada bulut altından hızlıca geçerek güneşten alınacak enerjiyi arttırmak, akülere sürekli şarj deşarj yapmaktansa belirli bir şekilde aküyü sürekli deşarj etmeye çalışmak belli başlı stratejiler arasında gösterilebilir.



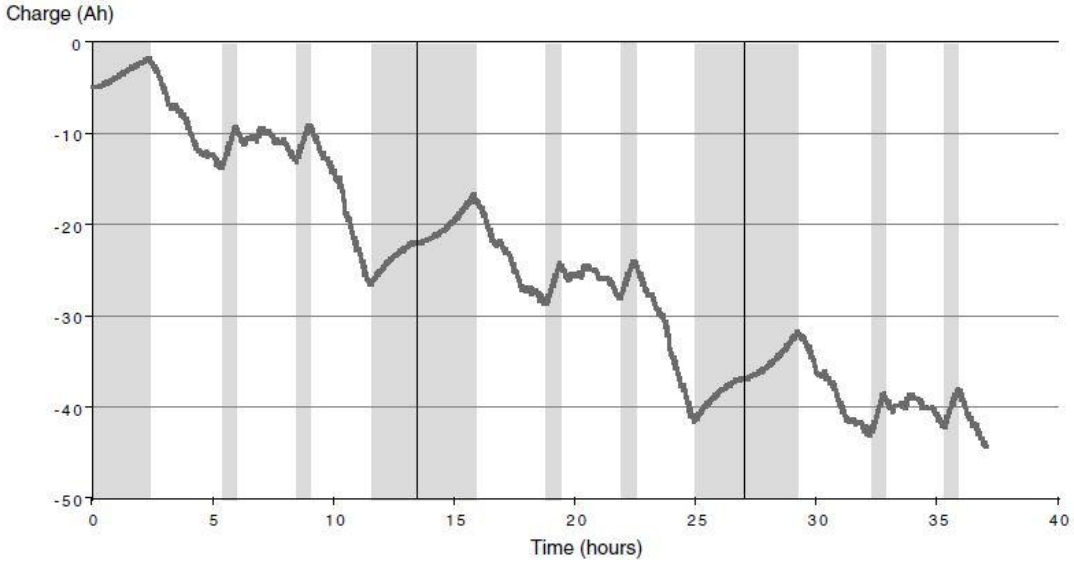
Şekil 7.8 Aküyü Sürekli Deşarj Etme Stratejisi - Yol Boyunca Aküdeki Enerji Grafiği [24]

Şekil 7.8'de görülen grafik 5 günlük ve toplamda 37 saatlik bir yarış için çıkarılmış bir grafiktir. Ancak yarış boyunca kontrol noktalarında (kırmızı noktalar) belirli süreler beklendiği için, bu optimum (en iyi) deşarj eğrisi şekil 7.9'daki hali almaktadır.



Şekil 7.9 Kontrol Noktaları da Göze Alındığında Akünün Boşalma Stratejisi [7]

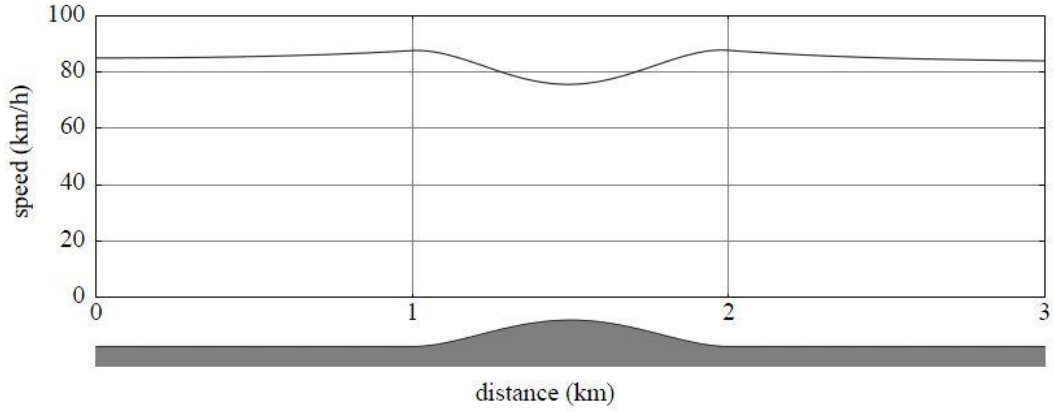
Bunlara ek olarak, aşağıda bir akü deşarj testinin sonuç eğrisi verilmiştir. Test sırasında kullanılan güç profili World Solar Challenge'ın 3 gününe karşılık gelmektedir. Dikey siyah çizgiler gün sonlarını göstermektedir. Gölgeli kısımlar ise güneş arabasının durduğu zamanları göstermektedir. Sabah ve akşam saatlerinde güneş gözeleri güneşe çevrilmiştir [25]. Böylece görülmektedir ki, gün içindeki duraklamalar, yol koşulları ve güneşten gelen enerjinin değişimi nedeniyle Şekil 7.10'daki optimum eğri aşağıdaki şekli almaktadır.



Şekil 7.10 Akü Deşarj Testi Eğrisi

WSC 3021 kilometrelik uzun bir yarış olduğundan yol boyunca birçok yokuş çıkmak ve inmek gerekmektedir. Bu yokuşlar öncesinden hızlanarak yokuşları önceden taşıta yüklenmiş kinetik enerjinin geri kazanımı ile daha çıkmaya çalışmak başka bir

strateji olarak verilebilir. Yokuş çıkma kabiliyeti, düşük motor güç ve momentleri sebebiyle güneş arabalarında oldukça sınırlıdır. Bu sebeple yokuş başlarına çok düşük seyir hızları ile gelmek, yokuşlarda güneş arabasının durmasına sebep olabilir.



Şekil 7.11 Yokuş Geçme Stratejisi [20]

Tüm bu değişkenler ışığında, gerekli koşulları işin içine katarak bir strateji oluşturmak çok önemlidir. Sadece yarış stratejisi sayesinde teknik olarak en iyi olmayan araç birinci olabileceği gibi, teknik olarak en iyi araç birinci olamayabilir. Bu noktada oluşturulan ve yarış sırasında sürekli güncellenebilecek bir strateji takımlara yarışı kazandıracak altın anahtarlardan biridir.

8. YARIŞ STRATEJİSİ GELİŞTİRME

Yarış stratejisi temel olarak iki ana başlıkta incelenebilir. Bunlardan birincisi yarış öncesinde, her bir parçanın (alt sistemin ya da çevreye ait özelliğin) benzetiminin yapılması ile elde edilen modeller kullanılarak yarış için geliştirilen ön strateji olarak tanımlanabilir. İkincisi ise, yarış sırasında gerçek zamanlı veri işleyerek oluşturulan stratejidir.

8.1 Yarış Öncesi Strateji Geliştirme

8.1.1 Hız Kontrolü

Hız Kontrol Stratejisi, simülasyonda hız referansı bloğu ile oluşturulan referans hızın, hız kontrolörüne gönderilmesi ile sağlanmaktadır.

Hız referansını üretmek yarış stratejisini oluşturmak demektir. Bunun için değişik yaklaşımlar yapılabilir. Örneğin;

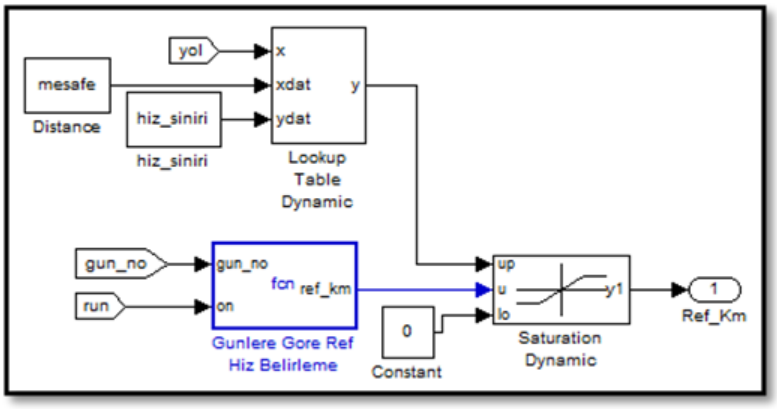
1. Her gün için farklı bir hızda gitme stratejisi
2. Kontrol Noktaları arasında farklı hızlarla gitme stratejisi
3. Yükseklik farklarına göre farklı hızlarda gitme stratejisi
4. Sabah ve akşam yavaş, öğlenleri güneşten gelen tüm enerjiyi kullanacak kadar hızlı gitme stratejisi

Ancak hangi strateji uygulanırsa uygulansın, yol boyunca hız limitlerine uymak zorunludur. Bu nedenle de yol boyunca hız limitleri belirlenerek simülasyona dâhil edilmiştir [26].

Bu çalışmada yukarıda bahsedilen ilk iki strateji karşılaştırılmıştır.

8.1.1.1 Günlük Ortalama Sabit Hız Stratejisi

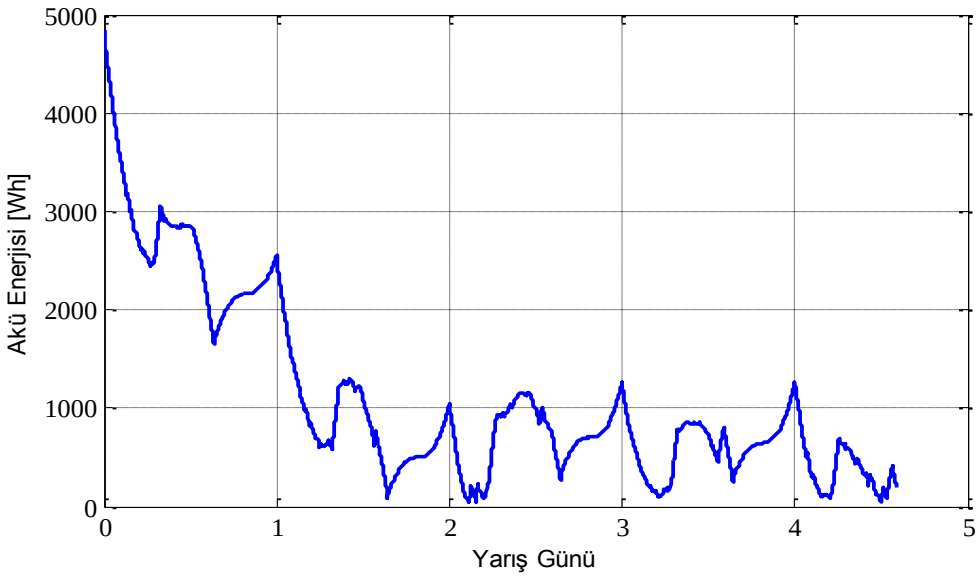
Bu stratejide, gün gün referans hız değiştirilmektedir. Bu değişiklikler yapılırken o gün boyunca alınacak mesafelerde eğimler dikkate alınmıştır.



Şekil 8.1 Referansı Bloğunun İç Yapısı

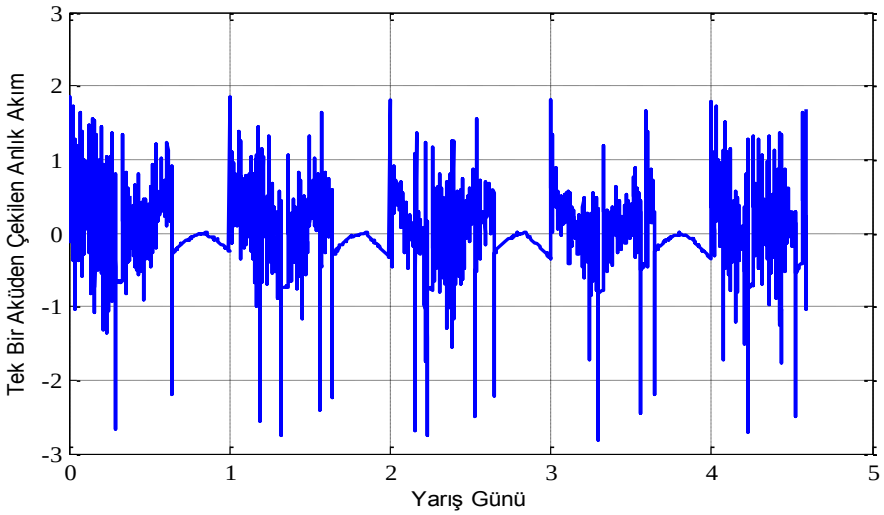
Çizelge 8.1 Günlük Referans Hız Değerleri

Gün	Referans Hız
1	78
2	79
3	76
4	80
5	79



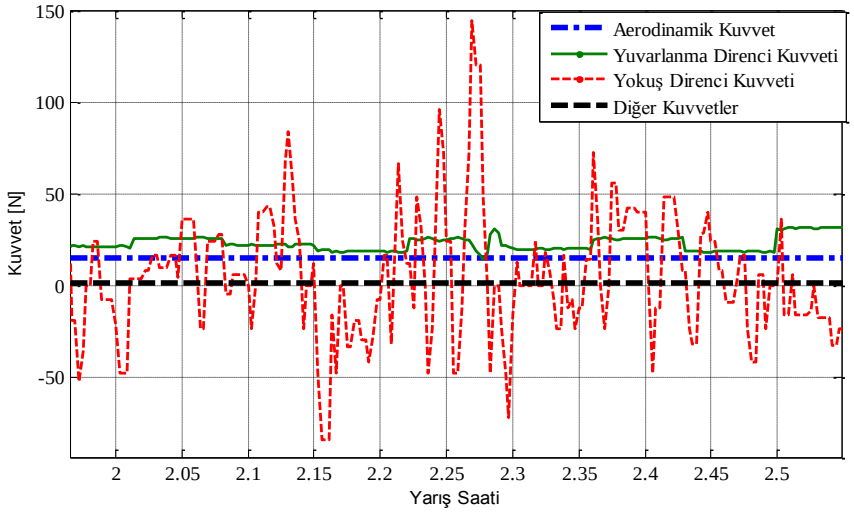
Şekil 8.2 Yarış Boyunca Akü Enerjisinin Değişimi

Aşağıda akü kutusundan çekilen akımın paralel kol sayısına bölünerek bir aküden çekilen akımın değişiminin gösterildiği grafik verilmiştir. Bu grafikte koyu olan bölgeler yoğun olarak o genlikteki akımın çekildiğini göstermektedir. Grafik incelendiğinde en yüksek deşarj akımının 1.63A yani 0.52C değerinde olduğu, tüm yarışın ortalaması alınırsa da 0.5A yani 0.16C gibi bir değerde olduğu görülmektedir.



Şekil 8.3 Tek Bir Akünün Akımının Grafiği

Yarış boyunca aracı en çok zorlayan kuvvet eğim (yokuş) direnci kuvvetidir. Özellikle ilk gün yoğun yokuşlarla karşılaşıldığı için diğer günlere göre daha yavaş gitmek, böylece aerodinamik ve yuvarlanma direncini nispeten azaltarak anlık motor gücünü ve akü akımını düşürmek mantıklı olacaktır.



Şekil 8.4 Yarış Boyunca Araca Etki Eden Kuvvetlerin Değişimi

Çizelge 8.2 Günlük Alınan Yollar

Gün	Başlangıç	Bitiş	Alınan Yol
1	0	632,8	632,8
2	632,8	1277	644,2
3	1277	1874	597
4	1874	2486	612
5	2486	3021	535

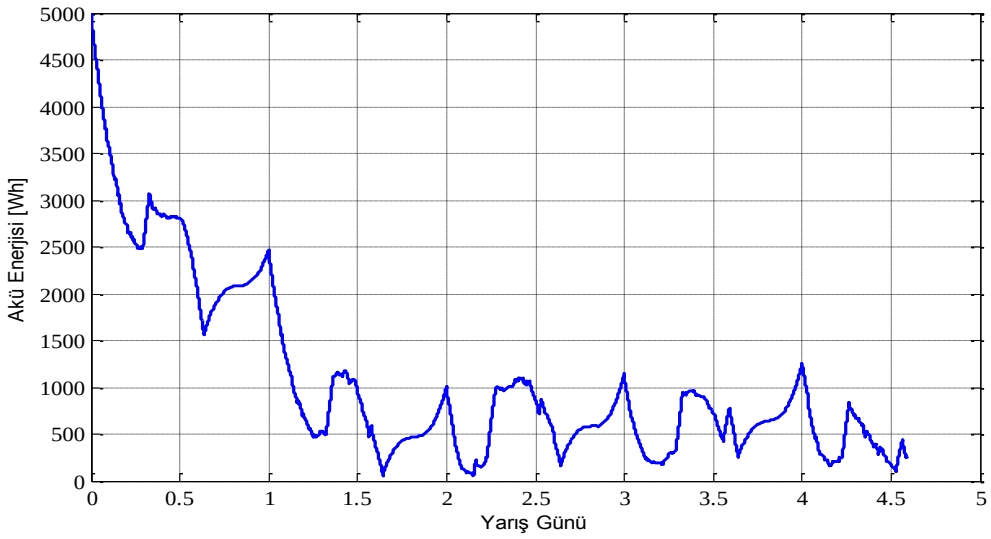
Bu strateji sonucunda, **75,07 Km/h ortalama** hız ile yarış 5.gün bitirilmektedir.

8.1.1.2 Kontrol Noktaları Arasında Farklı Sabit Ortalama Hız Stratejisi

Burada bölgelere göre hız referanslarını belirlemek için o bölgenin geçildiği saat ve eğim bilgileri önemlidir. Öğlen saatinde daha dik yokuşa sahip bir bölge, sabah saatinde geçilen daha az yokuşlu bir bölgeden daha hızlı geçilebilir.

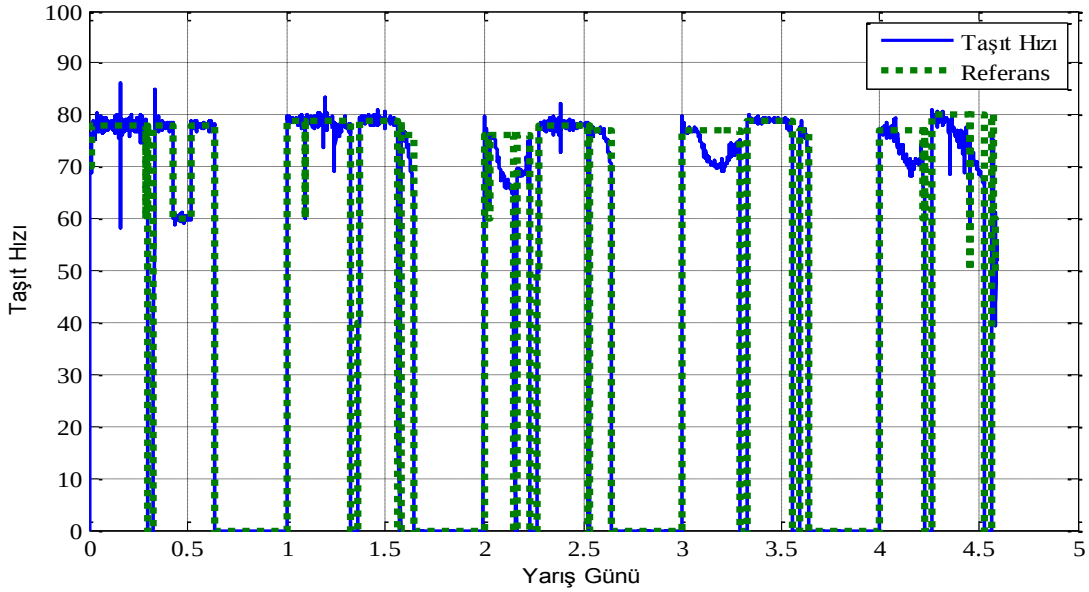
Çizelge 8.3 Kontrol Noktaları Arasındaki Referans Hızlar

Bölge	Km Aralığı	Referans Hız [Km/h]
1.Bölge	0-318	78
2.Bölge	318-633	78
3.Bölge	633-988	79
4.Bölge	988-1211	79
5.Bölge	1211-1493	76
6.Bölge	1493-1766	78
7.Bölge	1766-2180	77
8.Bölge	2180-2431	79
9.Bölge	2431-2719	77
10.Bölge	2719-2998	80
11.Bölge	2998-3021	80



Şekil 8.5 Yarış Boyunca Akü Enerjisinin Değişimi

Bara gerilimi düştükçe istenilen referans hızdan sapmalar olduğu aşağıda verilen grafikte açıkça görülmektedir. Bu nedenle yarışın ilk gününde daha yavaş gidilerek aküden harcanan enerjinin azaltılması, böylece de istenilen referans hızda gidilmesi sağlanabilir.



Şekil 8.6 Yarış Boyunca Aracın Hızı

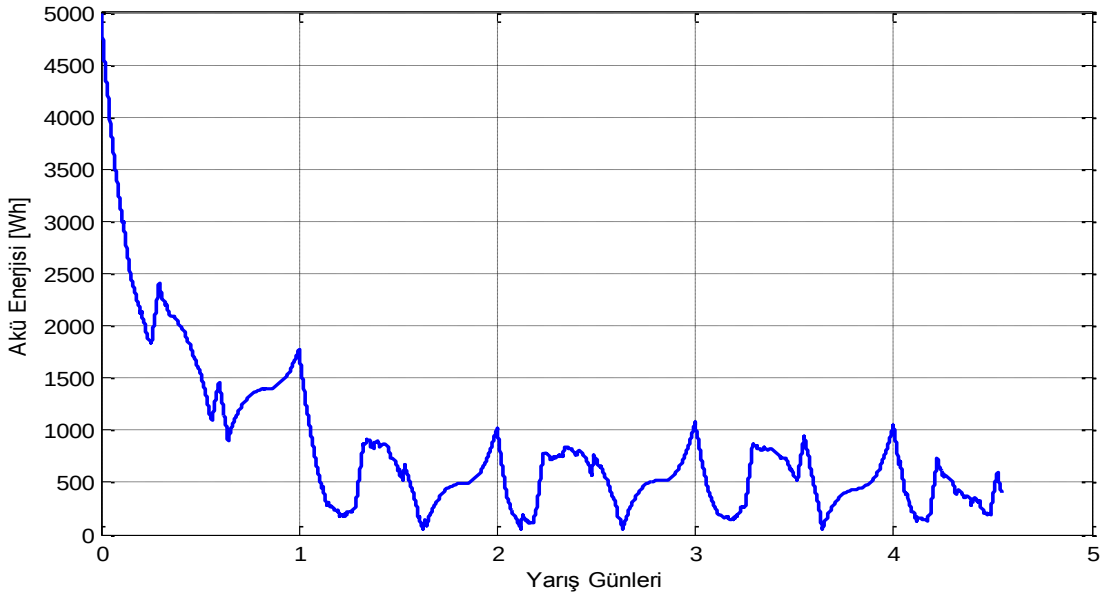
Çizelge 8.4 Günlük Alınan Mesafeler

Gün	Başlangıç	Bitiş	Alınan Yol
1	0	632,8	632,8
2	632,8	1277	644,2
3	1277	1881	604
4	1881	2486	605
5	2486	3021	535

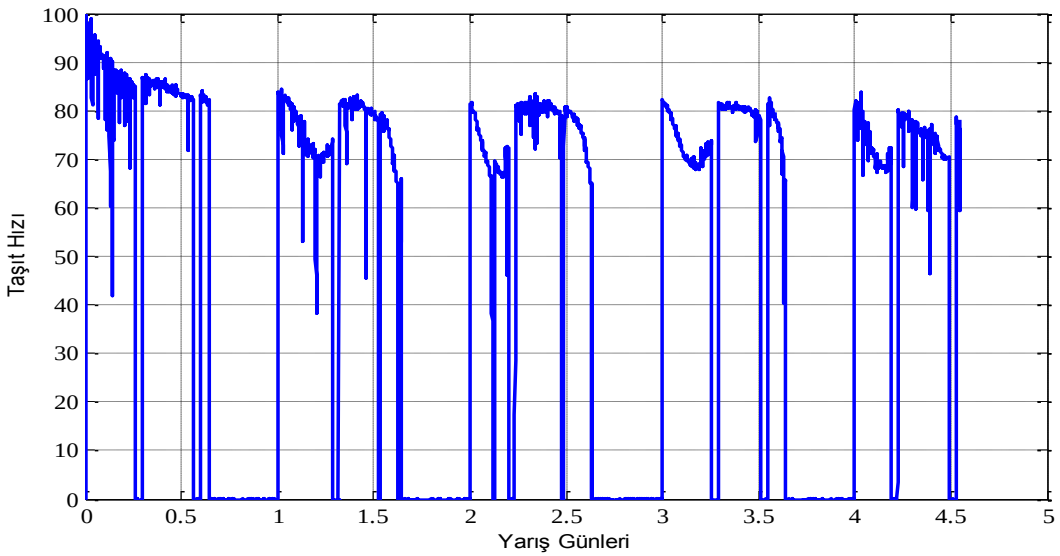
Bu strateji sonucunda, **75,06 Km/h ortalama** hız ile yarış 5.gün bitirilmektedir.

8.1.2 Tork Kontrolü Stratejisi

Tork kontrolü ile oluşturulan yarış stratejisinde taşıta akım referansı verilmektedir. Hız kontrolü stratejileri ile karşılaştırıldığında tork kontrolöründe aküler daha hızlı deşarj olmuşlardır. Şekil 8.7'de verilen grafiğe bakılacak olursa akünün belirlenen alt limite ulaşmasından (akünün bitmesinden) dolayı kenara çekilerek belirlenen süre boyunca bekletilmesi gerekmiştir.



Şekil 8.7 Yol Boyunca Akü Enerjisi Değişimi



Şekil 8.8 Yarış Boyunca Aracın Hızı

Şekil 31'deki yarış süresi boyunca taşıt hızı grafiğine bakılacak olunursa, verilen akım referansı ile taşıt ilk gün ortalamasının çok üstündeki değerlerde seyretmiş, ancak ikinci günden itibaren akülerindeki enerjinin azalmasından dolayı hızı ortalama hızının altına düşmüştür.

Bu strateji sonucunda, **76,19 Km/h ortalama** hız ile yarış 5.gün bitirilmektedir.

8.2 Yarış Sırasında Strateji Geliştirme

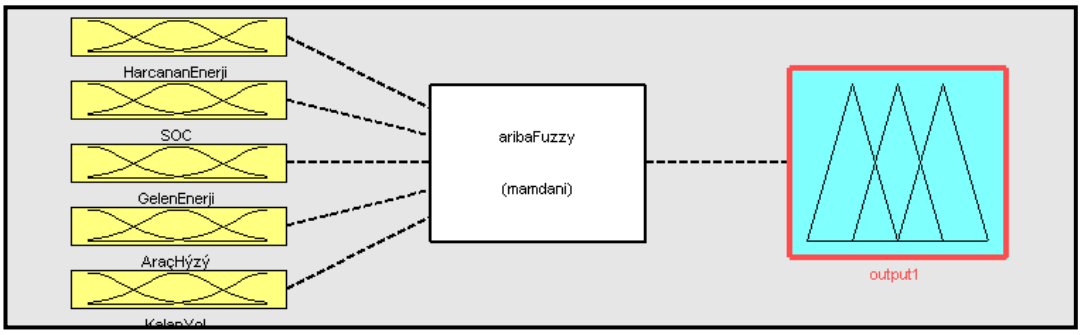
8.2.1 Bulanık Kontrolör

Gerçek zamanlı veri işleyerek taşıtın gitmesi gereken hız referansını ayarlayabilecek kontrolör yapılarından biri bulanık kontrolördür. Burada amaç, yarış sırasında gerçek zamanlı ölçülen verileri göz önünde bulundurarak karar veren stratejistin yerine geçecek bir sistem yaratmaktır. Bu şekilde bir insandan çok daha kısa sürede; stres, baskı vb. insani şartlardan bağımsız hesap yaparak hız değişimini kontrol edebilecek bir sistem yaratılabilir.

Bulanık kontrolör oluşturulurken aşağıdaki adımlar izlenmektedir.

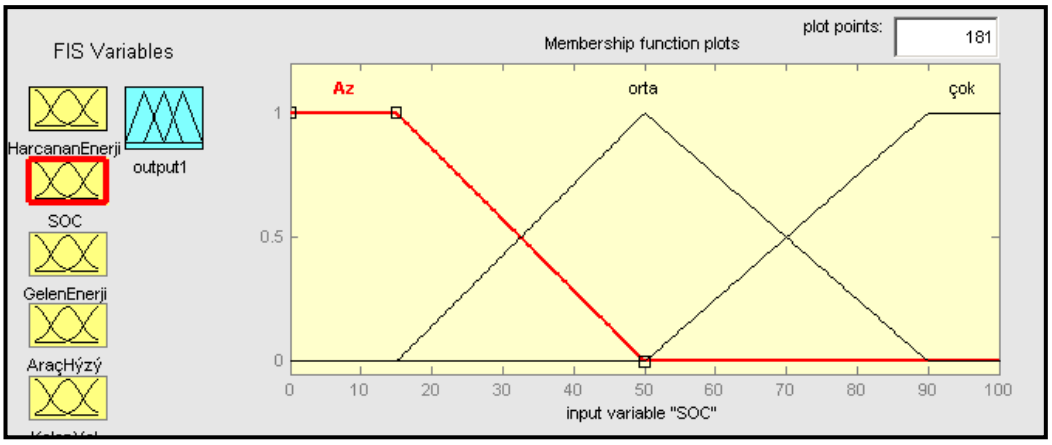
- Uzman sistem
    - Modellemesi (Değişkenlere karar verilmesi)
        - Modelin üyelik fonksiyonlarının oluşturulması
        - Kural tabanının oluşturulması
- Test

Bulanık mantık stratejisi öne sürülürken öncelikle bulanık kontrolör yapısında bir uzman sistem ortaya konur. Bu uzman sistem baz alınarak değişimlere nasıl tepki verileceği bir uzmanlık birikiminden faydalanılarak belirlenir. Uzman sistem oluşturulurken 2009 yılı yarış verilerinden yararlanılmıştır. Bu veriler yardımı ile taşıtın hızının mantıklı (plausible) olarak ayarlanabilmesi için uzman sistemin 5 üyelik fonksiyonundan oluşturulmasına karar verilmiştir. Şekil 9'da sistemin genel yapısı gözükmektedir.



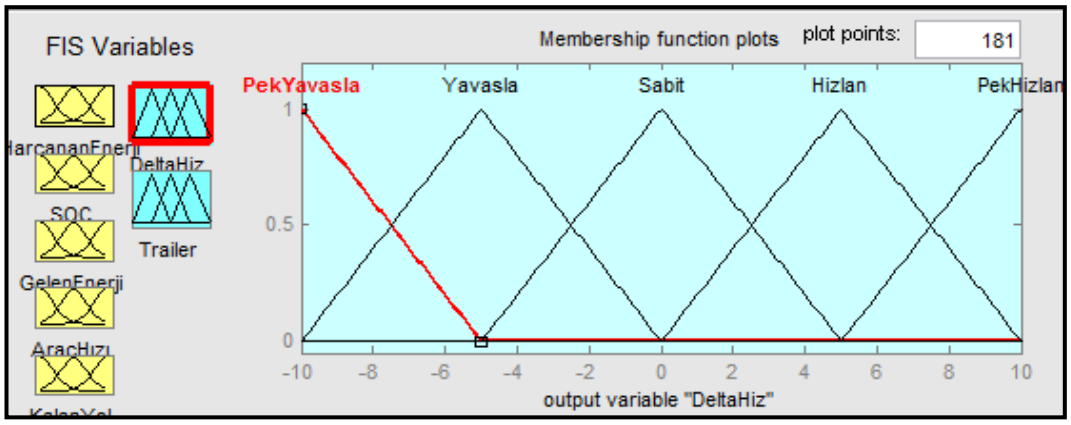
Şekil 8.9 Bulanık Kontrolörün Matlabdaki Temel Görünümü

Her bir üyelik fonksiyonunun az, orta ve çok olmak üzere 3 kademeli olmasının yeterli olacağına karar verilmiştir. Şekil 8.10'da bir üyelik fonksiyonunun değişimi verilmiştir.



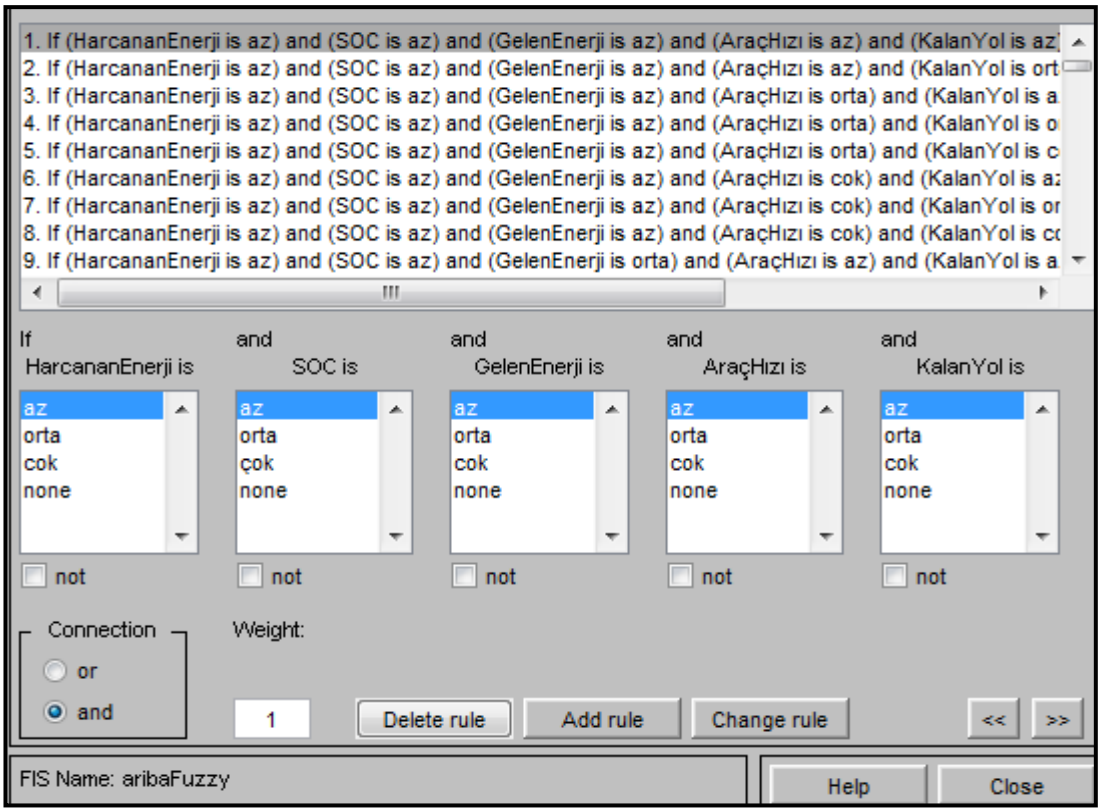
Şekil 8.10 Üyelik fonksiyonunun yapısı

Çıkış üyelik fonksiyonu ise 5 kademeli olacak şekilde modellenmiştir. Hız değişimi sistemin işlem kabiliyetine göre belirlenecek olup, bu örnekte -10 / +10 km/h arasında değişecek şekilde boyutlandırılmıştır.



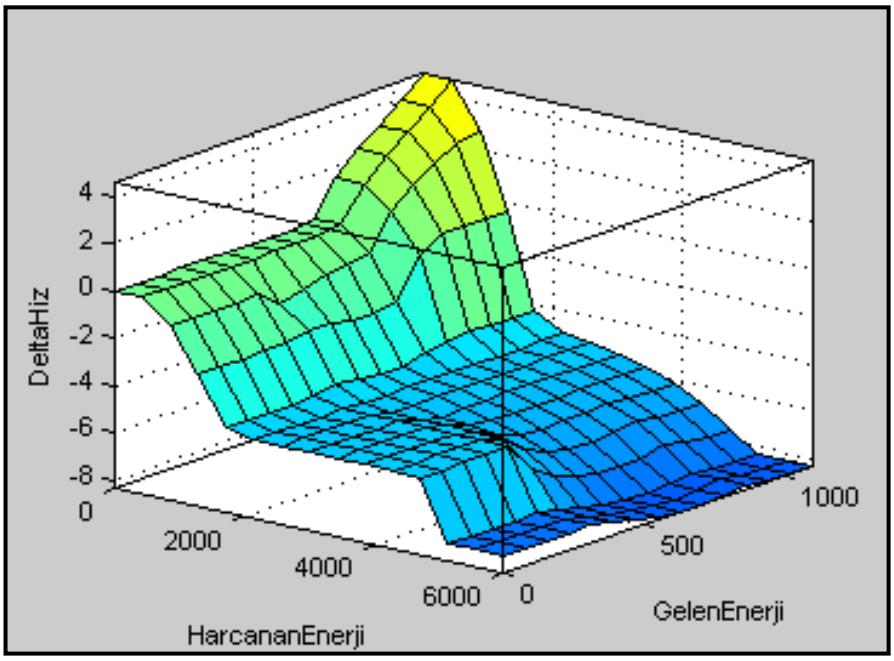
Şekil 8.11 Çıkış Üyelik Fonksiyonu

Uzman sistemin kural Çizelgesunun çıkarılması gerekmektedir. Kural Çizelgesu 3^5 yani 243 durumdan oluşmaktadır. Şekil 8.12'de kural Çizelgesundan bir örnek görüntü verilmiştir.



Şekil 8.12 Kural Çizelgesu

Baz alınan uzman sisteme göre 5 durumun ölçüm değerleri alındığında, bu değerler kural Çizelgesu ile eşleştirilerek gerekli çıkışın verilmesi ile çalışan bu sistemin örnek çıktısı şekil 8.13'te verilmiştir.



Şekil 8.13 Örnek sistem çıkışı

8.2.2 Optimal Kontrol

Optimal kontrol algoritması ile yarış stratejisi oluşturulmasında ana amaç, yarış boyunca elde edilebilecek maksimum ortalama hız değerine ulaşmak olarak belirlenmiştir. Herhangi bir anda sistemdeki enerji miktarı bu amaca ulaşmakla doğrudan ilgilidir.

8.2.2.1 Model

Model çıkarılırken belirli sadeleştirilmelere giderek modeli basitleştirmek çözümü kolaylaştırmak adına etkilidir [27]. Bu basitleştirmeler şöyledir:

- Arabanın rejeneratif fren sistemi yoktur.
- Arabayı ivmelendirmek için gereken enerji, yarış boyunca harcanan enerji yanında çok küçüktür. Bu nedenle arabayı ivmelendirmek için gerekli kuvvet ihmal edilmiştir.
- Arabaya etki eden, onu durdurmaya çalışan asıl kuvvetler aerodinamik direnç ve yuvarlanma direnci olarak kabul edilmiştir.

Arabayı hareket ettiren güç, kuvvet ve hız olarak hayat bulur. Bu güç, direnç kuvvetlerini yenmek için kullanılır. P_b aküden gelen güç, P_s güneşten elde edilen güç (Bu güç, yeryüzündeki enlem değerine, yılın hangi günlerinde yarışıldığına ve günün zamanına bağlıdır.), C_r yuvarlanma direnci katsayısı (taşıt ağırlığını da içerecek şekilde) ve C_a aerodinamik direnç katsayısı (aerodinamik dirençle ilgili diğer sabit büyüklükleri de içerecek şekilde) olmak üzere ilgili güç eşitliği aşağıda verilmiştir.

$$P_b + P_s - v(c_r + c_a v^2) = 0 \tag{7.1}$$

Güneşten gelen gücü veren P_s için hesaplamalarda güneş etkenleri dikkate alınmıştır. Aküden sağlanan güç P_b, akümdeki enerjinin negatif türevi olarak düşünülebilir. E, akümdeki enerji olmak üzere şöyle yazılabilir:

$$P_b = -\frac{dE}{dt} = -\dot{E} \tag{7.2}$$

Buna göre enerji eşitliği şöyle yazılabilir:

$$P_s - v(c_r + c_a v^2) = \dot{E} \tag{7.3}$$

Hız ise konumun zamanla değişimi olarak yazılabilir:

$$v = \dot{x} \tag{7.4}$$

Burada bir başlangıç enerjisi tanımı yapmak gerekir. Aküde saklanabilecek en büyük enerji miktarı başlangıç enerjisidir. Yarışın sonunda bu enerji sıfıra eşit olmalıdır. Aküden sağlanacak enerji yarış boyunca pozitif değerde olmalıdır.

8.2.2.2 Stratejiler

Yarış stratejisini hava koşulları, yarış alanının eğimi, yarışma günü sayısı gibi birçok değişken etkilemektedir. Optimal kontrol algoritmasında, stratejiyi etkileyen en önemli değişken de yarışın tipidir. Yarış tipi aşağıdaki gibi kategorize edilebilir [27]:

- Sabit mesafeli yarış: Burada toplam zaman minimize edilmelidir.
- Sabit zamanlı yarış: burada alınan mesafe maksimize edilmelidir.

Optimal kontrol ile sabit mesafeli yarış stratejisi oluşturmak için öncelikle yarış pistinin toplam uzunluğuna ihtiyaç vardır. Buna göre en kısa zamanda yarışmayı bitirmek esastır.

$$\dot{E} = P_s - v(c_r + c_a v^2) \tag{7.5}$$

$$\dot{x} = v \tag{7.6}$$

T, yarışı bitirme süresi olmak üzere, bu süre minimize edilmek istenmektedir. Enerji ve alınan yolun ilk ve yarış sonu değerleri aşağıdaki gibidir.

$$E(t_0) = E_0$$
$$x(t_0) = 0$$
$$E(T) = 0$$
$$x(T) = X$$

Burada önemli husus E(T)=0 eşitliğidir. Gerçekten de yarış sonunda E(T)=0 olmaz ise, bu durum daha hızlı gidebilecekken gidilmediği anlamına gelir. X değeri ise yarışın verilen uzunluğudur.

Verilen probleme göre sistemin E ve X olmak üzere 2 durum değişkeni vardır. Bununla beraber bir kontrol değişkeni (V) vardır.

Sisteme modelleyen denklem şöyle idi:

$$\dot{E} = P_s - v(c_r + c_a v^2) \tag{7.5}$$

$$\dot{x} = v \tag{7.6}$$

Buradan enerji ifadesine geçilirse;

$$E(t) = \int_{t_0}^{t} P_s(\tau)d\tau - vT(c_r + c_a v^2) + E_0 \tag{7.7}$$

$$x = vt \tag{7.8}$$

elde edilir. İfade sınır koşullarına göre sadeleştirilse;

$$E(T) = 0 = \int_{t_0}^{X/v} P_s(\tau)d\tau - X(c_r + c_a v^2) + E_0 \tag{7.9}$$

Yukarıda verilen denklemin çözümü optimal hız değeri olan v* değerini verir ki, bu değer aynı zamanda zamanı minimize eden hız değeridir.

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Avusturalya'da yapılacak olan World Solar Challenge 2011 yarışına katılacak güneş arabası ARIBA V'in, bilgisayar ortamında modellenmesi ile taşıtın seyir dinamiği ile ilgili davranışları ve taşıt elektriksel sisteminin ve enerji bütçesinin yarış boyunca olan durumu incelenmeye çalışılmıştır. World Solar Challenge pist ve uzun yol yarışı olmak üzere 2 farklı karakterde etaptan oluştuğu için, bu etaplar farklı yazılımlar hazırlanarak (ve kullanılarak) incelenmiştir.

Yarış öncesi pist etabı için CarMaker yazılımı kullanılarak seyir dinamiği ile ilgili etütler yapılmıştır. Tasarımdan doğan seyir dinamiği özellikleri bilgisayar vasıtasıyla önceden hesaplanmış, tur süresi (zamanı) belirlenmiştir. 2009 yılında aynı pistte 2.58.00 ile turunu tamamlayan ARIBA IV'ün geliştirilmesi ile oluşturulan ARIBA V adlı taşıt, teorik sınırlarına kadar zorlanarak 2.18.40 tur zamanına sahip olabilmektedir. İki taşıt arasında ortalama hızlarda bir karşılaştırma yapılacak olursa, ARIBA IV'ün 57.76 Km/h ortalama hızının, ARIBA V ile 73.44 Km/h'e çıkarıldığı görülmüştür.

Bu tarz seyir dinamiği simülasyon çalışmaları son yıllarda gerek binek gerekse ticari taşıtlar için çokça yapılmakta, bu sayede üretim öncesi taşıt sanal ortamda denenerek, tasarım istenilen dinamik sınırlara daha kolay yaklaştırılabilmektedir. Bu ön etütler sayesinde çeşitli ön seçenekler bilgisayarda değerlendirilip elenerek, gerçek prototipler için gereken maddi kaynaklar azaltılabilmekte ve taşıtın gerçekteki teknik sınırları belirlenirken ve optimize edilirken test sürücülerinin etkileri azaltılabilmektedir. Gelecekte de bu çalışmadakine benzer özel taşıtlar da dahil olmak üzere, her türlü kara taşıtı için benzer simülasyonlar giderek artan oranda AR-GE çalışmalarında yerlerini alacaktır.

Uzun yol yarışı için ise, Matlab/Simulink yazılımında özgün bir program hazırlanarak oldukça detaylı bir enerji simülasyonu oluşturulmuştur. Bu enerji simülasyonu kullanılarak farklı stratejiler geliştirilmiş, bu stratejileri birbiri ile karşılaştırma imkanı bulunmuştur. Enerji simülasyonu için oluşturulan modeller ile yapılan analizler sonucunda görülmektedir ki, farklı stratejiler ile aynı taşıt yarışı daha kısa sürede bitirebilmektedir.

Bu nedenle, tüm taşıt alt-sistemlerinin ve çevre koşullarının olabildiğince gerçeğe yakın modellenerek bilgisayar ortamına aktarılması gerekmektedir. Bu sayede gerçeğe yakın çözümler üretilerek daha doğru yarış stratejileri geliştirmek mümkün olabilecektir.

Uzun yol parkuru için öne sürülen iki hız kontrol stratejisi karşılaştırıldığında, parkurun sektörleri bazında verilen referans değerlerinin günlük verilen değerlere (tüm gün için tek bir hız referans değerinin verilmesi) çok yakın olmasından dolayı iki strateji birbirine çok yakın sonuçlar vermiştir. Diğer yandan tork kontrolünde akü, hız kontrolüne nazaran daha fazla zorlanmış olsa da, yol güzergâhının özellikleri nedeniyle yine de sabit ortalama hız stratejilerinden daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Bu çalışmada taşıtın doğrusal dinamiğinin parkur boyunca kontrolüne dair iki ayrı yöntem, multidisipliner bir simülasyon yazılımı hazırlanarak incelenmiştir.

Bu yöntemler seyir hızının ve tahrik tekerleği momentinin kontrolü yöntemleridir. Her iki yöntemin de kendine özgü davranışları mevcuttur. Özellikle yüksek eğimli yokuş çıkışlarında tork kontrolü enerji verimliliği açısından daha verimli olurken, diğer yandan negatif eğimde ve düze yakın bölgelerde hız kontrolörü daha iyi sonuçlar vermektedir. Bu nedenle iki kontrolörün beraber çalıştırılması ile daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Diğer yandan tez kapsamında değinilmemiş olan güç kontrolü ve optimal kontrol yöntemleri sisteme dahil edilip incelenebilir. Bu sayede farklı kontrol yöntemlerinin karşılaştırılması ile en iyi sonuca ulaşmak mümkün olacaktır.

World Solar Challenge 2011 yarışı için güneş arabası doğrusal dinamik simülasyonu ve kontrolü çalışmalarına devam edilmekte olup, bu iki farklı kontrolör tipinin bir arada kullanılması veya optimal kontrol yöntemlerinin sisteme dahil edilmesi, ekibin sonraki çalışmalarında üzerinde önemle duracağı konular olacaktır.

KAYNAKLAR

[1] **Url-1** <http://www.pvresources.com/>

[2] **Url-2** Serin, O, 2008, Güneş Gözelerinden Elde Edilen Enerjinin Şebekeye Aktarılması, Lisans Bitirme Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

[3] **Özgöçmen, A**., 2007, Güneş Pilleri Kullanılarak Enerji Üretimi, Yüksek Lisans Tezi

[4] **Fahrenbruch, A.L. ve Bube, R.T.,** 1983, *Fundamentals of Solar Cells*, Academic Press

[5] **Tiwari, G.N.,** 2004, *Solar energy : fundamentals, design, modelling and applications*, New Delhi

[6] **Url-3** <http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_vehicle>

[7] **Pudney, P.** , 2000, Optimal Energy Management for Solar-Powered Cars, Doktora Tezi, University of South Australia.

[8] **Url-4** <http://www.itugae.com>

[9] **Url-5** <http://www.csiro.au/>

[10] **Url-6** <http://cuersunspot.wordpress.com/2009/08/11/inside-natures-geeks-the-electrical-engineer/>

[11] **Url-7** <http://www.tritium.com.au>

[12] **Url-8** <http://en.wikipedia.org/wiki/Tour_de_Sol>

[13] **Url-9** <http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_car_racing>

[14] CSIro Elektrik Motoru Veri Yaprağı

[15] Permanent Magnet Direct Current Machines, Rochester Institute of Technology, Sf 2.

[16] **Carroll, D.**, Ekim,2003, *The Winning Solar Car*, SAE International.

[17] GPS Road Data", 2003, World Solar Challenge Commitee.

[18] **Kıncay, O.**, 2008, Güneş Enerjisi Ders Notları

[19] Sunpower A300 Veri Yaprağı

[20] Drivetek Race MPPT Veri Yaprağı

[21] Panasonic Li-Ion Akü Veri Yaprağı

[22] Route Notes, 2009, World Solar Challenge Commitee

[23] **Takamuro, M. ve diğ.**, 1996, Solar Car Cruising Strategy and Its Supporting System, SAE Japan.

[24] **Pudney, P., Howlett, P.,** 2002, Optimal driving strategy for a solar car on a level road, *IMA Journal of Mathematics Applied in Business & Industry*, sf 59-91

[25] **Pudney, P., Howlett, P.,** 2002, Critical Speed Control of a Solar Car, *Optimization and Engineering*, sf 97-107

[26] Road data, World Solar Challenge Commitee, 2009

[27] **Santosa, F**., "Solar Car Racing Strategies"



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Onur Serin

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul – 28.07.1985

Adres: Fatih Mh. Umurreis Cd. 17/B2 Blok D:4 Büyükçekmece / İstanbul

Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi

Yayın Listesi:

- Atabay O, **Serin O**, "Bir Güneş Arabasının uzun parkurlu yarışlar için çok disiplinli simülasyonu",12. Otomotiv ve Üretim Teknolojileri Sempozyumu, Bursa, 2011.
- Atabay O, Demiröz O, Köksal Y.Z, **Serin O**, "Bir Güneş Arabası için Ön Aks Askı Sistemi Tasarımı ",12. Otomotiv ve Üretim Teknolojileri Sempozyumu, Bursa, 2011.