

DÖRT TEKERLEKLİ GÜNEŞ ENERJİLİ ELEKTRİKLİ TAŞITLAR İÇİN GÖVDE, TAHRİK SİSTEMİ VE YÜRÜYEN AKSAM TASARIMI

Mustafa Topçu^{*}, Umut Çakmak^{*}, Büşra Uğurlu^{*}, Fatih Can^{*,**},
Orhan Atabay^{***}

^{*}İTÜ Makina Fakültesi Motorlar ve Taşıtlar Laboratuvarı Güneş Arabası Atölyesi İstanbul

^{**}ASELSAN MGEO Ankara

^{***}İTÜ Makina Fakültesi Motorlar ve Taşıtlar Laboratuvarı İstanbul

ÖZET

Bu çalışma İTÜ Güneş Arabası ekibinin ARIBA 6 adlı aracında tasarım sürecinde ve tasarımdan sonra, süspansiyon geometrisinin ve kabuk tasarımının belirlenmesi, taşıtın bilgisayar ortamında modellenerek oluşturulan strateji çalışmalarının incelenmesi, daha stabil ve güvenilir bir araç için yapılan hesaplamaların incelenmesi amacıyla yapılmıştır. ARIBA 6'yı mümkün olduğunca stabil ve konforlu yapabilmek için pek çok süspansiyon geometrisi senaryoları denenerek, MSC/ADAMS ticari programında optimize edilip uygulanmıştır. Güneş enerjisi ile çalışan araçların en önemli özelliklerinden birisi de aracın daha az enerji harcaması için kabuk tasarımında özel, rüzgâr direncini minimum düzeye indirecek profillerin tercih edilmesidir. Bu profiller araç üzerinde öncelikle SOLIDWORKS yazılımında modellenip aracın farklı bölgelerinde kullanılarak ANSYS/FLUENT ticari programında analizleri yapılmış ve araca etkileyen rüzgâr direnci minimize edilmiştir. Aracın tahrik sistemi ve stratejisi ise IPG/Car Maker ve Matlab programlarında modellenerek farklı senaryolarda elde edilebilecek en yüksek enerji verimliliği hedeflenmiştir. Bu çalışma güneş arabalarında kabuk tasarımı, süspansiyon tasarımı, stratejinin belirlenmesi ve daha stabil ve güvenilirliği yüksek bir güneş arabasının yapılmasına yönelik bir ön çalışma niteliğindedir.

Anahtar Kelimeler: Güneş Arabası, Yürüyen Aksam Tasarımı, Gövde Tasarımı, Tahrik Sistemi, Tüm-Taşıtlar Simülasyonu

ABSTRACT

This study was carried out to investigate suspension geometry and shell design of ARIBA 6, the sixth solar electric car of Istanbul Technical University Solar Car Team, while in design process and after design process; examining the research of strategy which is modelled in the computer environment and calculations for more stable and reliable vehicle several suspension geometry scenarios were tried and optimized by MSC/ADAMS commercial software and applied in order to make ARIBA 6 more stable and more comfortable. The most significant property of solar vehicles is that they make use of solar energy and they need to be very efficient at this point so tens of special profiles used to minimize aerodynamic resistance in order to consume less energy. These profiles firstly modelled by SOLIDWORKS commercial software and were put different regions on the vehicle and analyzed in ANSYS/FLUENT commercial software and aerodynamic resistance was minimized. Propulsion system and strategy of the vehicle is modelled and optimized by using IPG/Car Maker and MATLAB commercial softwares. Another benefit of this study is that these optimizations are preliminary works for aerodynamic design, suspension system design, determining strategy and to intend more reliable solar car.

Keywords: Solar Car, Suspension System Design, Shell Design, Propulsion System

1.GİRİŞ

Güneş arabaları enerji ihtiyaçlarının tamamını veya bir kısmını direkt olarak güneşten elde eden elektrikli araçlardır. Genellikle bu araçlar üzerinde güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren fotovoltaik güneş panelleri bulunmaktadır.

İlk güneş arabası 1955'te General Motors tarafından yapılmış ve üretildikten sonra yapılan açıklamalara göre panel veriminin yüzde yüz olması halinde bile bir aracın enerjisinin tam olarak karşılanamayacağı açıklanmıştır.[1] O zamandan bugüne kadar güneş arabaları çok büyük bir gelişim göstermiştir. Günümüzde bazı araçlarda, tamamen olmasa da, güneş enerjisinden havalandırma ve elektronik sistemlerin enerji ihtiyacı karşılanabilmektedir.

Güneş arabaları üzerine düzenlenen ilk yarış 1985 yılına dayanmaktadır ve Fransa'da gerçekleşmiştir. Bu yıldan itibaren büyük rağbet gören bu yarışlar dünyanın çeşitli bölgelerinde hala devam etmektedir ve bu yarışlardan en önemlisi olan "World Solar Challenge" – WSC 1987'den beri Avustralya'da düzenlenmektedir. 2013 yılında 23 ülkeden 40 ayrı ekibin katılım gösterdiği bu yarış Avustralya'nın kuzey kıyısında yer alan Darwin şehrinden güney kıyılarında yer alan Adelaide şehrine kadar yaklaşık 3000 km'lik bir etaplan oluşmaktadır.

2013 yılına kadar düzenlenen WSC organizasyonlarında araçlar ağırlıktan tasarruf etmek için 3 tekerlekli olarak tasarlanmışlardır. Ancak 2012 yılında yayınlanan kurallara göre WSC organizasyonuna daha önce katılan ekipler için dört tekerlekli bir tasarım yapma koşulu getirilmiştir. Bu noktada arka iki tekerlekten simetrik tahrik ve elektronik diferansiyel kullanımı düz gidişi destekleyerek enerji kayıplarını önlerken, tek tekerlekten asimetrik tahrik direksiyon simidinde ekstra bir moment oluşturmakta ve sürücünün direksiyonu ters yöne çevirerek bu momenti dengelemesi ve düz gidişi temin etmesi gerekmektedir. Ayrıca yeni kurallara göre sürücünün öne yaklaştırılması ve kurallarda belirtilen gerekli görüş açılarının sağlanması gerekmektedir.[2]

2.TEMEL HESAPLAMALAR

Bu çalışmada güneş enerjili elektrikli prototip bir taşıtın gövdesinin, tahrik sisteminin ve yürüyen aksının tasarımı yapılmıştır. Taşıtın tasarımına öncelikle tahrik aksı yerinin tayin edilmesi ile başlanmıştır. Prototip bir araç olan ARIBA 6'nın tahrik aksı arka aks olarak belirlenmiştir. Yapısı gereği nispeten daha karmaşık ve hareketli olan ön düzen yerine direksiyon sistemi olmayan arka aks üzerinden tahriğin olması daha basit ve elverişli bir seçim olacaktır. Tahrik motoru sabit mknatıslı bir doğru akım motoru olup, arka aksta jant içine yerleştirilmiştir.

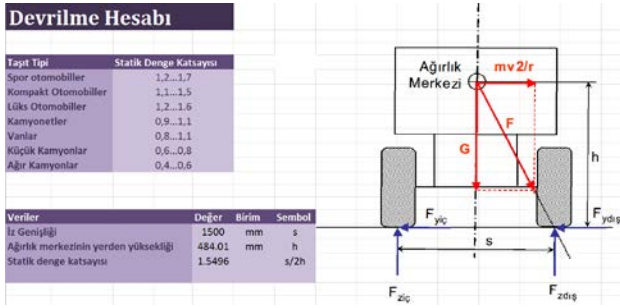
Tasarımda ikinci temel aşama, aks aralığı (akslar arası mesafe) ve iz genişliğinin (sağ-sol tekerlekler arası

mesafenin) tayinidir. Bu sürece paralel olarak aşağıdaki temel hesaplar yapılmıştır:

Ağırlık Merkezi Hesabı: Aracın toplam ağırlığı güneş enerjili aracın enerji bütçesi, ağırlık merkezinin yeri ise, yol tutuş, stabilite, ivmelenme ve frenleme performansı gibi temel kriterler açısından önemlidir. Ağırlık merkezinin yeri, sürücülü ve sürücüsüz araç olacak şekilde iki hal için de hesaplanmıştır. Sürücülü bir araç için ön arka aks arası yük dağılım yüzdeleri %60 arka aks, %40 ön aks olarak düşünülmüştür. Aks aralığı belirlenirken ön ve arka akslara düşen kütle yüzdelerinin istenilen ölçülerde tutulması konusu gözetilir. Araç kütlesinin belirlenebilmesi için tasarım boyunca giderek daha fazla detay içerecek şekilde, parça kütlelerini ve konumlarını gösterecek şekilde tablolar hazırlanmıştır. Araç yaklaşık 300 ayrı parçadan meydana gelmektedir. Üretimden sonra gerçek araçta yapılan ölçümler ile daha önce yapılmış olan kestirimler arasındaki fark, ± 1 kg mertebelerindedir. Araç akslar arası ağırlık dağılımı seyir esnasında gövdenin ve süspansiyon elemanlarının maruz kalacağı kuvvetlerin belirlenmesinde de (ADAMS çalışmaları) temel faktördür.

İz Genişliği ve Dingil Mesafesi: Aracın iz açıklığını ve dingil mesafesini belirlerken aracın stabilitesini yitirmemesi ve aracın kurallarda belirtilen boyutlara ve viraj dönüş mesafelerine göre ölçülendirilmesi hususları göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca dingil mesafesini ve iz açıklığını belirlerken irdelenmesi gereken diğer bir husus da aracın ağırlık dağılımı olmuştur. Dingil mesafesi aracın kafa vurma (baş eğme) hesaplarında, iz açıklığı ise direksiyon sistemi ve devrilme hesaplarında önemli birer unsur olacaklardır. Aks aralığı tayininden sonra ağırlık merkezinin konumunun ön aks ve arka aksa olan uzaklığı da ara bir çıktı değeri olarak belirlenmiştir.

Devrilme Konusu: Dönemeçlerde devrilme konusunun incelenmesi için, merkezkaç kuvvet ile ağırlık kuvvetinin etkisinde basit bir quasi-statik hesap yapmak mümkündür. Burada gövde yaylarının ve tekerleklerin dönemeç hareketinde çökme yapmadıkları kabulü yapılmış, statik stabilite faktörü (SSF) hesaplanarak basit bir kontrolle hesaplara başlanmıştır [3]. Yapılan bu hesabın yanı sıra MSC/ADAMS ve IPG/CarMaker yazılımları kullanılarak aracın süspansiyon sistemini de dikkate alan dinamik devrilme hali de incelenmiş ve statik basit incelemede ne kadar bir hata payı ile çalışıldığı ortaya çıkarılmıştır.



Şekil 1: Statik stabilite faktörü ile devrilme hesabı

Kafa Vurma (Baş eğme) Hareketleri: Aracın kafa vurma hesaplarında fren anında oluşan yavaşlama ivmesi ve bu sebeple oluşan eylemsizlik kuvveti dikkate alınarak, aracı kafa vurmaya zorlayan momentler ile aracı yolda tutan momentlerin dengesine bakılmıştır. Bu şartlar altında aracın gireceği yarışların kurallarında bahsi geçen yavaşlama ivmelerinde arka aksa düşen ağırlıklar hesaplanmış, aracın bu ivmeler altında arka aksının yere bastığı kuvvet incelenmiştir. Yapılan temel hesaplar daha sonra MSC/ADAMS ve IPG/CarMaker'da ilgili fren manevralarının koşulması ile teyit edilmiştir.

Tekerlek Yatak Hesapları: Tekerlek yatakları ile ilgili CAD tasarımına başlanmadan önce ön ve arka teker yataklarında oluşacak zorlanmaları karşılayabilecek en uygun rulmanın seçimi için tekerlek yatağı hesabı gerekmektedir. Bu amaçla piyasada bulunabilen rulmanlar incelenmiş, aracın tekerlek merkezlerine gelen kuvvetler hesaplanarak literatürde yer alan hesaplamalar sonucu en uygun rulman seçilmiştir.

Yay ve Amortisör Sertliği Hesapları: Askı sistemini oluşturacak parçaların malzemesine karar verilmesi ve tasarımlarının yapılabilmesi için, askı sistemine etki eden statik ve dinamik yüklerin hesaplanması gerekmektedir. Yapılması düşünülen süspansiyon sisteminde ön ve arka süspansiyon elemanlarının (askı çubukları, yay ve sönümleyici) şasiye bağlanacağı yerler (hardpointler – asılış sabit noktaları) tayin edilerek, gerekli yay yolu ve karakter hesaplarının yapılması gerekir. Aracın akslarına, gövdesine ve sürücüye yoldan gelen kuvvetlerin etkisini sönümlemek üzere uygun sertlik ve sönüm değer ve karakterlerine sahip yay ve sönümleme elemanlarının seçilmesi gerekmektedir. Güneş arabasında, aerodinamik dirençle ve enerji bütçesi ile ilgili kaygılar en üst seviyede olduğundan, gövdenin zemine göre olan tasarım konumunun sürüş esnasında da çok değişmemesi gerekmektedir. Bu sebeple toplam yay yolu 50 mm civarlarında olup, yaya ait sönümsüz özgül frekans 1.8 Hz mertebelerindedir. Yarış araçlarında pist yarışları için toplam yay yolları 25-50mm civarında seçilmektedir [4]

Hardpointlerin(Asılış Sabit Noktalarının) Tayini: Elde edilen veriler ışığında aracın süspansiyon sistemi

tasarımının önemli bir aşaması olan hardpoint'ler belirlenmiştir.

Bütün hesaplanan temel verilerin ışığında ARIBA 6 ön ve arka askı sistemlerinin tasarımına, mukavemet kriterleri de göz önüne alınarak 3D çizim ve analiz programı olan Solidworks'de başlanmıştır. Ardından MSC/ADAMS programında aksların kinematik ve dinamik analizleri gerçekleştirilmek suretiyle ön ve arka askı sistemlerinin kinematik açıları konusunda kesin kararlar verilmiş ve daha sonra da ANSYS programında mukavemet analizleri gerçekleştirilmiştir. Söz konusu olan prototip nitelikli güneş arabasında, askı kolu, yay ve amortisör bağlantı noktalarında metal-metale kontaktlar mevcuttur. Bir elastik burç (bushing) yapısı göstermeyen bu bağlantılar sebebiyle, elastokinematik hesaplara gerek duyulmamıştır.

3. ARACIN DIŞ GÖVDE PROFİLİ VE ŞAŞI TASARIM ÇALIŞMALARI – AERODİNAMİK ÖZELLİKLER

Tasarlanacak yeni araç için en önemli hedef 0 [km/h] -130 [km/h] olarak belirlenen tüm hız aralığında daha az hava direncine maruz kalacak şekilde bir form ortaya çıkarmaktır. Genel kayıpların başında gelen aerodinamik kayıpları en aza indiren bir tasarım yapılması gözetilerek aracın enerji tüketimi açısından yüksek verimli olmasına özen gösterilmiştir.

Araca hareket halinde etkiyecek aerodinamik kuvvetler 4 ana bileşen olarak ele alınmıştır. Bunlardan birincisi yüzey pürüzlülüğü ve araç üzerinde oluşan sınır tabaka etkisiyle meydana gelen sürtünme kuvvetidir. Aracın yüzeyinde bir hava direnci olarak etkisini gösterecek kuvvetin aynı zamanda büyük yüzeyler için toplam kuvvetler içerisinde en yüksek değere sahip olduğu bilinmektedir[5].

İkinci bileşen aracın şekli sebebiyle oluşacak basınç gradyanlarının meydana getirdiği sürüklenme kuvvetidir. Hareket halindeki aracın arkasında karman caddesi (karman vortex street) olarak kendini gösteren etkinin bu bölgede oluşturduğu negatif basınç sebebiyle aracı arkaya doğru çekecek veya başka bir açıdan bakıldığında aracın bu bölgeyi peşinde sürüklemesine neden olacaktır. Bu etki sürtünme etkisinden sonra dikkate alınan ikinci önemli bileşendir. Aracın şekli ile ilgili değerlendirmelerde bu etki de gözetilmiştir[5].

Yukarıda yer alan iki önemli etkinin yanında indüklenmiş sürüklenme ve etkileşim sürüklemesi olarak bilinen iki aerodinamik etki daha vardır. İndüklenmiş sürüklenme etkisi güneş arabasına uyarlandığında, arabanın alt yüzeyi ile üst yüzeyi arasındaki basınç farkından meydana gelen yan kısımlardaki basınç sıçramaları olarak düşünülebilir. Ancak araçtan taşıma veya bastırma kuvveti üretmesi gibi bir beklenti olmadığından sonuç olarak ortaya çıkacak tasarımda bu basınç farkının oldukça az olacağı düşünülmüştür. Bu kuvveti yönlendirmek için yapılacak modifikasyonlar ilk iki kuvveti de etkileyeceğinden tasarımda en son husus

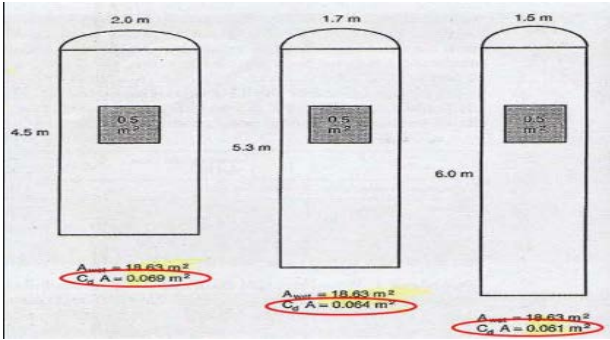
olarak dikkate alınmalıdır [5].

Son olarak etkisi bilinen kuvvet bileşeni etkileşim sürüklemesidir. Etkileşim sürüklemesi farklı elemanların birleşme yerlerinde birleşme şekillerine göre ortaya çıkan bir etkidir. Bu etkinin de diğer iki büyük etkinin yanında oldukça az olduğu hesaplanmıştır. Ancak yapılacak modifikasyonlar diğer önemli iki kuvveti etkilemeyeceğinden tasarımda üçüncü olarak dikkate alınacak aerodinamik etki olarak belirlenmiştir [5].

Sonuç olarak yukarıda belirlenen etkilerin hepsini dikkate alabilmek için aracın bileşenlerine ayrılıp, ayrı ayrı tasarlanmasına karar verilmiştir. Tasarım aşamasında yüzey sürtünmesi ve basınç sürüklemesi etkisi optimize edilerek en uygun tasarıma ulaşılmaya çalışılmış ardından elemanları birleştirme işlemi sırasında etkileşim sürüklemesi etkisi dikkate alınarak gerekli görülen modifikasyonlar ile birleştirme işlemi yapılmıştır.

- Birinci kısım gövde olarak belirlenmiş, aracın ana şekli bu kısımda oluşturulmuştur. İkinci kısım gövdenin alt kısmında sürücünün oturması için şekillendirilen küvet kısmıdır. Üçüncü kısım sürücünün kafası üzerine oturtulan “kanopi” (kokpit kapağı) ve dördüncü kısım da tekerleklerin etrafına giydirilen kaplamalardır (çamurluklar ya da “fairing”ler).

Gövde Profili Tasarımı: Bu aşamada ilk önce $6m^2$ ’lik güneş paneli yüzey alanını oluşturacak 2 boyutlu büyüklüğüne karar verilmiştir. Yüzey sürtünmesinin ve basınç sürüklemesinin narinlik oranı yüksek şekillerde daha düşük olduğu bilindiği için aracın olabildiğince ince ve uzun şekilde yapılmasına karar verilmiştir.



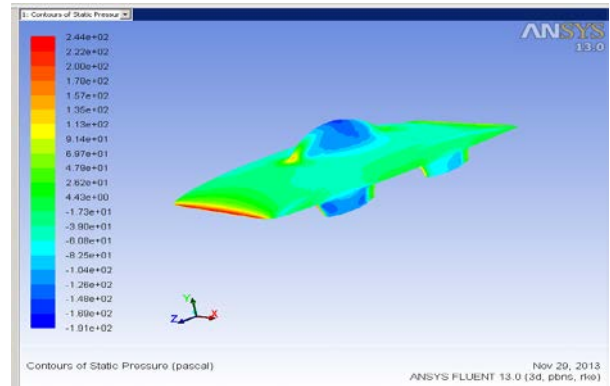
Şekil 2: Boyutların aerodinamiğe etkisi[6]

İkinci aşamada gövdenin ürettiği sürüklemeyi esas etkileyecek olan NACA profil şekline karar verilmiştir.

Üçüncü olarak mekanik ekibin ön ve arka askı sistemleri tasarımında ve süspansiyon yerleşiminde talep ettiği alan için belli bir gövde kalınlığına ihtiyaç vardır. Bu oranın profile daha önce karar verilen uzunluk için belli bir kalınlık oranı verilerek yaratılabileceği durumlar hesaplanmış ve incelenecek profiller tekrar güncellenmiştir.

Belirlenen profillerin analizleri sonucunda elde edilen aerodinamik katsayıların değerlendirilmesi sonrasında bir NACA profil serisi belirlenmiş ve araç bu profil düzeninde şekillendirilmiştir. Bu çalışmalar sadece aracın gövdesi için değil fairing, küvet ve kanopi için de tekrarlanmış ve bu parçalardan elde edilen analizler sonucunda en uygun 3 boyutlu tasarımlar oluşturulmaya çalışılmıştır.

Tasarlanan parçaların yine bilgisayar ortamında birleştirilmesi sonucunda araç bir bütün halinde ortaya çıkmaktadır. Aracın tam olarak modellenmesinden sonra ortaya çıkan model Şekil 3’te görüldüğü üzere FLUENT yazılımına aktarılarak aracın 3 boyutlu akış analizi yapılmıştır. Analizlerden elde edilen katsayılar sonucu aracın enerji tüketiminde büyük bir pay sahibi olan aerodinamik kuvvetlerden dolayı oluşan enerji kaybı yaklaşık olarak hesaplanabilmiştir.



Şekil 3: Aracın 3 boyutlu FLUENT analizi

Aracın dış profilinin belirlenmesi sonucu sürücünün oturacağı yerlerin ve süspansiyon sisteminin araç gövdesine bağlanacağı şekillendirilmiştir. Yapılan araç gövdesi karbon ve yapısal köpükten oluşturulmuştur. Aynı şekilde kompozit malzemeler aracın şasisini de oluşturmuştur. Şasi tasarlanırken en önemli hedef aracın yük taşımayan bölgelerindeki yapıların ağırlık yapmaması için uygun şekilde hafifletilmesi ve şasinin süspansiyon ile bağlantılı olduğu yerlerde aracın yerden gelen kuvvetler karşısında burulma, eğilme ve basma- çekme kuvvetlerine karşı mukavim ve hafif bir yapının tasarlanması olmuştur.

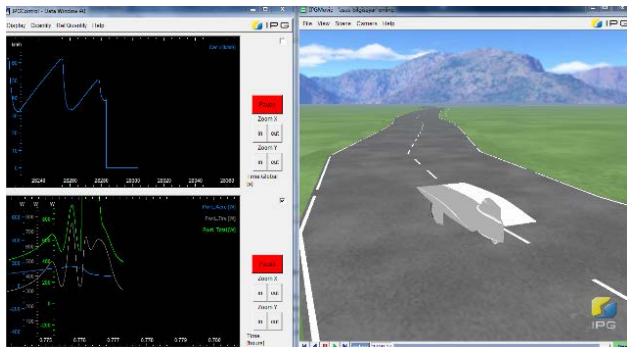
Bu amaçla aracın şasisinde yük taşımayan ön ve arka kısımlar gerekli boşaltmalar yapılarak aracın üst kabuğuna bağlanmış süspansiyon braketlerinin bulunduğu kısımda ise farklı malzemeler kullanılarak o bölgenin ilgili zorlamalara karşı daha mukavim olması sağlanmıştır. Ayrıca yerden gelen kuvvetler sonucunda araç şasisinde oluşan burulma alt tarafından karbon malzeme ile kapalı olan şasi profilinin üst tarafında da kapatılması sayesinde büyük bir ölçüde önlenmiştir.

Burada kasıt, merdiven tipteki karbon şasinin yer yer tam kapalı kutu profil kesitli halde tasarlanmış olmasıdır.

4. ARAÇ DİNAMİĞİ SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Bu çalışmada İTÜ Güneş arabası ekibi ilk defa 4 tekerlekli bir araç tasarlamıştır. Yeni aracın 4 tekerlekli olacak olması tahrik sistemi konusunda bazı soruları da beraberinde getirmiştir. Tahrik aksının daha önceki grup bünyesinde üretilmiş olan beş adet araçta olduğu gibi, yine aracın arka tekerleklerinden olacağı kararına varılmıştır. Ancak burada karar verilmesi gereken husus bu tahriğin tek tekerlekten mi, yoksa çift tekerlekten mi olacağı konusudur. Güneş enerjili araçlarda, söz konusu olan motor güçlerinin ve seyir performanslarının düşük olması sebebiyle, genellikle tek tekerlekten tahrik ciddi bir teknik sorun oluşturmamaktadır. Tahrik kuvvetinin taşıt simetri eksenine göre asimetrik olmasından dolayı, aracı düşey eksen etrafında çevirmeye çalışan bir moment oluşmaktadır. Bu moment doğrusal seyirde, cüzi bir miktar direksiyon sapması verilerek karşılanabilir. Konu ile ilgili, hem tek izli taşıt modeli üzerinden hem de daha karmaşık ADAMS modelleri üzerinden hesaplar yapılmıştır. 70 km/h ile doğrusal seyirde söz konusu direksiyon simidi sapması 3-4 dereceler mertebesinde olup, bunun getireceği güç kaybı tek izli modelden yaklaşık 4W olarak hesaplanmıştır. Uzun parkurlu güneş arabası yarışlarında (WSC gibi) bu güç kaybı akümüle olarak akü kapasitesinin %5'leri mertebesine ulaşabilir.

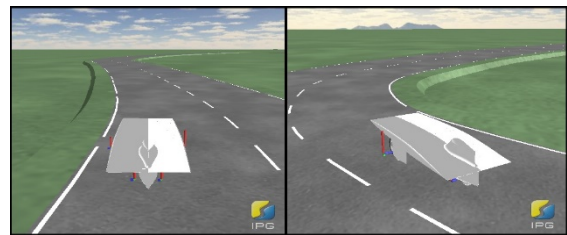
Tek tekerlekten asimetrik tahrik yerine iki tekerlekten tahriğin de dezavantajı mevcut olup, bu, ilave küttedir. Yani ilave bir elektrik motoru ve bu motorun ihtiyaç duyacağı sürücü devresi, taşıta ilave ağırlık getirecektir. Bu ilave ağırlık da gerek yuvarlanma, gerekse ivmelenme dirençlerinde kendini hissettirecektir. Durum enerji bütçesi bakımından dikkatle incelenmiş olup, neticede asimetrik tahriğin daha uygun olduğu kanaatine varılmıştır. Nitekim söz konusu prototip aracın imalatından çok daha sonra ortaya çıkan bir husus olarak, WSC 2013 yarışında 1. ve 2. sıraları alan takımların araçları da asimetrik tahriklidir. Dolayısı ile verilen karar, rakiplerin de aynı seçimi yapmış olmasından ötürü sonradan teyit edilmiş bulunmaktadır. Benzer hesaplar IPG/CarMaker yazılımı kullanılarak da, gerek kısa, gerekse uzun parkurlu yarışlar için yapılmıştır.



Şekil4: Aracın Matlab/Simulink ve IPG/Car-Maker programları ile birlikte enerji co-simülasyonu

Car-Maker ile MATLAB/Simulink yazılım ortamlarının bir arada kullanılması ile hazırlanmış olan, aracın enerji hesabının ve stabilite hesaplarının beraberce yapılabildiği simülasyon ortamında, bir taraftan araç performansı incelenmekte, yol tutuş ve dönemeç performansı araştırılmakta, diğer taraftan da sanal parkurlar kurularak, şekil 4' te görüldüğü üzere enerji optimizasyonuna ve stratejisine yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

Bu yazılım ortamında aracın elektrik motoru, bataryası, güneş gözeleri MATLAB/Simulink yazılımında modellenmiştir. Bir taraftan da aracın aerodinamiği, süspansiyon sistemi, direksiyon sistemi, fren sistemi, yarışın yapılacağı parkur gibi öğeler IPG/CarMaker'da modellenmiştir. Bu iki model grubunun karşılıklı eş çalıştırılması ile yarış neredeyse tüm öğeleri ile bilgisayar ortamında oluşturulmuştur. Yarış parkuru üzerindeki sanal taşıtı, yine sanal bir sürücü olan IPG/Driver sanal sürücü modeli sürmektedir. Ayrıca bu simülasyon ortamına gerçek sürücüyü entegre edebilmek için, sisteme bir direksiyon simidi, vites kolu ve pedal sistemi bağlanmıştır. Böylece simüle edilmiş yarış şartlarında güneş arabası sürücüleri, yarış antrenmanı yapabilmekte, parkurları tanıyabilmekte, kendileri için özel olarak hazırlanmış görüntü ve grafik ara yüzlerden, araçlarının o sırada harcadığı enerjiyi, bu enerjinin bileşenlerini, akımları, gerilimleri, tekerlek kuvvetlerini, momentleri ve sisteme ait sayısız büyüklüğü izleyebilmektedirler. Bu çalışmaya sürüş simülatörü on-line çalışma modu adı verilebilir. Gerçek sürücünün sisteme dahil olmadığı şekil 5' te görülen off-line çalışma modunda ise, yarış stratejisi gibi yarışla ilgili kritik kararlar daha yarış, hatta araç yapılmadan çok önce tartışılabilmekte ve pek çok konuda optimum parametrelerle ilgili arayışlar gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 5: Aracın Sanal Olarak Pistte Sürülmesi

Taşıt tasarımı ile ilgili temel bazı kriterler olan, uygun motor büyüklüğü, uygun batarya kapasitesi, süspansiyona dair açı ve mesafeler, taşıt ana boyutlarının optimizasyonu gibi konular da bu sayede etüt edilebilmiştir. Böylece tüm taşıt, sürücü ve parkur bir bütün sistem olarak incelenmiş, aracın seyir performansı, enerji bütçesi ve yol tutuşu geliştirilmiştir.

5. SÜSPANSİYON VE TAHRİK MEKANİZMASININ DETAY TASARIMLARI

Güneş arabası yürüyen aksamı tasarımı sırasında taşıt tekniği ile ilgili kriterlerden uyarlanabilirlik, üretim kolaylığı, stabilite, enerji verimliliği gibi konulara ağırlık verilmiştir.

Ön askı sisteminde kamber, kaster, king-pin ve toe açıları, yuvarlanma daresi yarıçapı, kaster mesafesi, ve akslara ait yalpa merkezi yükseklikleri detaylıca incelenmiştir. Kamber ve toe açıları genellikle güneş arabalarında sıfır dereceye yakın yapılıdır. Enerji bütçesi ile ilgili sebeplerle, tekerleklerin yere tam dik basması ve taşıt uzunlamasına eksenine paralel kalmaları istenir.

Araç esas olarak aerodinamik unsurlara bağlı olarak tasarlandığı için süspansiyon sisteminin yüksek gövdeli araçlara uyarlanması gerekmektedir. Bu amaçla yapılacak olan güneş arabasında konvansiyonel araçlardaki gibi A kollarının tekerlek merkezini arasına aldığı tasarımlar yerine, A kollarının her ikisinin de tekerlek merkezinin üstünde olmasına karar verilmiştir.

Araçın yerden yüksekliği, dönüş çapı, şasi profil yüksekliği, şasiye bağlantı noktası ile ilgili paketleme sınırları gibi uyarlanabilme parametreleri beraberce karar ve hesap kriterlerini oluştururlar.

Güneş arabalarının kullandığı elektrik motorları, genelde sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları olup, tekerleğe arada herhangi bir aktarma mekanizması olmadan direct-drive olarak bağlanırlar. Bu motor yapısında ortada akımın geçtiği kabloların gömülü olduğu stator ve statorun her iki tarafında manyetik akıyı sağlayan mıknatıslar bulunmaktadır. Elektrik motorlarında hava aralığının değiştirilmesi ile verim-tork karakteristiği bir miktar değiştirilebilir. Tasarım ekibi bu bağlamda kendi enerji hesapları dahilinde bir hava boşluğu hesaplamış ve bunu referans olarak tasarımlar yapmıştır. Bu kısıtlamaya ilave olarak motorun çalışması sırasında ısınma probleminde yönelik bir tasarım yapılmaya da çalışılmıştır. Isınma ile ilgili tedbirler alınırken, mukavemet hesapları da paralel olarak yürütülmüş, şekil 6'da verilen motor jant formu ortaya çıkmıştır.



Şekil 6: Araçın Tahrik Sisteminin Tasarımı

Araça ait bir diğer tasarımsal uyarılama da araçın direksiyon sistemi için yapılmıştır. Yerleştirme ile ilgili

tasarımsal kısıtlamalardan dolayı direksiyon (dişli) kutusu ön tekerlerin önünde yer almıştır. Bu sebeple rotli bağlantılarının tekerlek merkezlerinin gerisinde yer aldığı geleneksel pinyon-kremayer yerleşiminden vazgeçilerek, özgün bir direksiyon kutusu ve deveboynu tasarımı yolu seçilmiştir. Özgün direksiyon kutusunun tasarımında ana kriter çevrim oranının seçimidir. Bunun dışında konstrüktif detaylar olarak, malzeme seçimi, yağlama ve sızdırmazlık gibi konulara çözümler getirilmesi gerekmiştir. Ayrıca klasik literatürde yer alan diş mukavemeti için gerekli hesaplar yapılarak diş modülü hesaplanmıştır. Bu hesaplardan aracın kurallarda istenilen dönüş yarıçaplarında dönebilmesi için gerekli teker dönüş açıları hesaplanmış ve bu açı için gerekli olan direksiyon simit sapması bulunarak pinyon dişlisinde olması gereken diş sayısı tespit edilmiştir.

Fren sistemi tasarımında aracın elektrik motorunun getirdiği rejeneratif fren de dikkate alınarak, katılacak yarışların kuralları gereğince çift devreli fren sistemi tasarlanmıştır. Mekanik frenleme kuvveti sadece ön tekerleklerden uygulanacak olup, arka aksta ise elektrikli rejeneratif fren görev yapmıştır. Araçın ön tekerleklerinde toplam 4 adet kaliper, ikişerli gruplar halinde her bir tekerlekte görev yapmaktadır. Yarış kurallarının belirlediği güvenli durma mesafesi ve gereken yavaşlama ivmesini sağlayacak koşulda hesaplar yapılmış, aracın güvenli bir şekilde durduğu bilgisayar ortamında öncelikle kontrol edilmiştir. Ayrıca bu çalışma sayesinde fren pedalı ölçüleri ve tekerlek balata disk geometrileri de ortaya çıkmıştır.

6. ARAÇ TEKERLEK ASILIŞ SİSTEMİNİN MSC/ADAMS YAZILIMINDA DETAY İNCELEMESİ

Güneş arabalarında en önemli konu aracın enerji tüketimidir. Enerji tüketimini azaltmak için araç tekerlek asılış sisteminin yol ve araç koşullarına uygun bir şekilde dizayn edilmesi gerekir. Bu hususta öncelikle araç için yapılması gerekli tekerlek asılış tipinin çift lades kemikli (çift A kollu – double wishbone) olmasına karar verilmiştir. Araçta temel ön aks kinematiki parametreleri:

- Kamber açısı: Tekerlek düzleminin yer normali ile yaptığı açıdır. Araçlarda yan kuvvet oluşturma potansiyelini arttırmak için negatif yönde uygulanır. Büyük kamber açılı araçlarda tekerlekte ilave olarak bir sürtünme direnci de olduğundan tasarlanan araçta 0 ila -0,5 derece arasında belirlenmiştir.

- King-pin açısı: Tekerlek saptırma ekseninin düşeyle (taşıt eni doğrultusunda) yaptığı açı olup seyir stabilitesini ve direksiyon geri getirme kuvvetini sağlamak için verilmektedir. [7] Modern binek taşıtlarda king-pin açısı 11°-15° derece mertebelerinde değişir.[8] Yarış araçları için king-pin açısı 7 derece civarında seçilebilir [4]

- Kaster açısı: Araca yandan bakıldığında king-pin eksenine yer normali arasındaki açıdır. Aşağıda bu terim için farklı araçlardaki kaster açıları belirtilmiştir.[7] Binek otomobillerde kaster açısı 8 derece mertebelerindedir. [9] Yarış taşıtlarında kaster açısı değerleri 2-6 derece arasındadır. [4]

- Yapısal Kaster: Kaster açısının ve king-pin eksenine eğim açısının konumunun neden olduğu bu değer direksiyonda hissedilen momenti belirleyen önemli parametrelerden biridir. Aracın kaster açısının tayin edilmesinde göz önünde bulundurulmuştur. [7]

- Toe açısı: Teker düzleminin taşıt boyuna eksenine ile yaptığı açı olan Toe açısı güneş enerjili arabalarda enerji bütçesi açısından negatif etki oluşturacakları gerekçesiyle istenmez. [7]

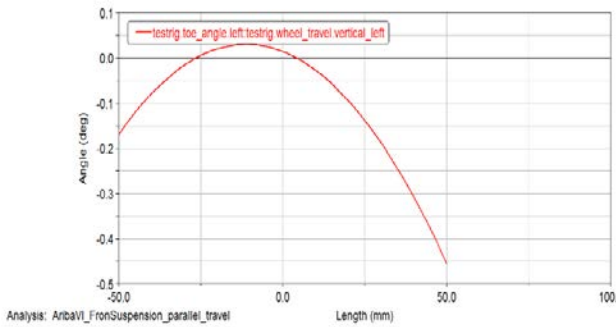
-Yalpa merkezi (roll center): Yapılan literatür araştırmalarında elde edilen verilerden birkaçı aşağıdaki gibidir.[7] Binek otomobillerin yalpa merkezleri 150 mm'nin altında, yarış taşıtlarında ise 40 mm'nin altında olacak şekilde seçilebilir. [4]

Bu veriler sonucunda ARIBA VI'nın yalpa merkezi yüksekliği 135 mm olarak belirlenmiştir.

Bu araştırmalardan elde edilen sonuçlar tasarım için bir başlangıç noktası oluşturmuş, analizler bu değerlerden yararlanılarak optimize edilmiştir. Ayrıca ekibin önceki çalışmalarında yapmış olduğu 5 adet güneş arabasının aks geometrisi parametreleri hakkında ekip bünyesinde oluşan geri dönüşler de, tasarım açısından en önemli unsur olarak görülmüş ve yapılacak olan aracın kinematik özelliklerinde önemli paya sahip olmuştur.

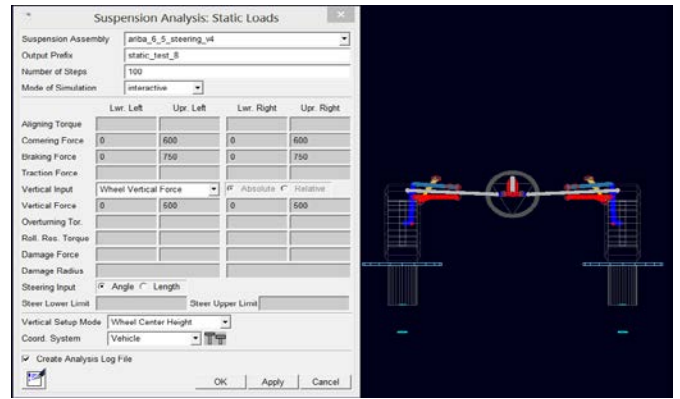
Aracın şasi ve aerodinamik yapısına uygun olarak tasarlanan çift A kollu süspansiyon tasarımının kinematik modellemesi yapılırken MSC/ADAMS yazılımındaki modelleme imkânlarından yararlanılmıştır. Tamamıyla gerçek tasarıma uygun olarak yapılan bu modelleme sonucu yapılan analizlerde;

- Aracın süspansiyon açılarının düz bir yolda veya herhangi bir çöküntü veya tümsekteki değişimi,



Şekil 7: Aracın toe açısının yer koşulları ile değişiminin MSC/ADAMS programında analizi

- Bu engebelerde askı takımının ve süspansiyon yaylarının boy değişimi,
- Aracın herhangi bir dönüşü esnasında açılarının değişimi ve dönüş yarıçapının kontrolü,
- Aracın viraj dönme esnasında direksiyonda oluşan momentin gözlemlenmesi ve bu esnada oluşan direksiyon kutusundaki kuvvetlerin belirlenmesi,
- Aracın yerden gelen kuvvetlere, fren kuvvetleri ve merkezkaç kuvvetlerine maruz kaldığı anlarda askı takımının bağlantı noktalarında oluşan kuvvetlerin incelenmesi
- Oluşan bu durumlarda bağlantı noktalarındaki kuvvetlerin ve aracın süspansiyon açılarının A kollarının arasındaki mesafe ile optimizasyonuna,



Şekil 8: Aracın yoldan gelen kuvvetler karşısında kinematik analizi

- A kollarının aracın şasisine uygun ölçülerde ve geometride monte edilmesine dikkat edilmiştir.

Bu analizler sonucunda aracın aks geometrisi için gerekli olan açılardan sonra yerleşimi için etüdler yapılmıştır. Yayların boy değimi sonucu şasi yüksekliği belirlenmiştir. Aracın dönüş yarıçapı modellemesinde elde edilen 7.8 m'lik mesafe araç üretildikten sonra yapılan ölçümle doğrulanmıştır. Ayrıca bağlantı noktalarındaki elde edilen kuvvetler mukavemet analizleri için kullanılmıştır.

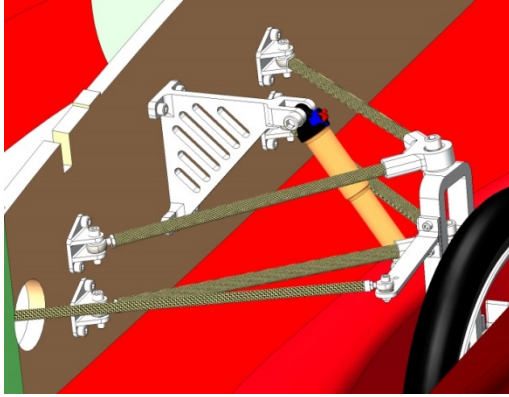
7. TASARIMLARIN MUKAVEMET ANALİZLERİ

Hafif bir araç enerji tüketimi açısından avantaj sağlamakla birlikte hafifleme konusunda özellikle aracın yürüyen aksamında gerekli mukavemet koşulları sağlanmadığında, bu durum geri dönülmez hatalara yol açabilir. Bu aşamada aracın pistte ve yolda seyir halinde iken maruz kalabileceği durumların doğru olarak hesaplanması gerekmektedir.

Araç seyir halinde iken tekerleklere etkiyen kuvvetler virajlarda oluşan kuvvetler, aracın frenleme veya pozitif ivmelenmesi sırasında oluşan kuvvetler ve yoldan alınan düşey kuvvetler olmak üzere üç çeşittir. Bu kuvvetler dışında araç içindeki mekanizmalardan oluşan sınır koşullarının da göz önünde bulundurulması gerekir.

Öncelikle basit bir hesap tablosu yazılımında elle yapılan hesaplar sonucunda bağlantı noktalarına gelen kuvvetler bulunmuştur. Daha sonra aracın MSC/ADAMS yazılımı yardımı ile oluşturulan multibody modellenmesi yardımı ile daha önce basit hesap tablosu yazılımı ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Elde edilen zorlama koşulları sınır koşulu olarak kullanılmıştır. Tasarım ANSYS/Structural programında modellenerek analizlere tabi tutulmuştur. Bu analizlerde askı sistemleri hem takım olarak, hem de tek tek parça halinde analize tabi tutulmuş, öngörülen sınır koşulları ve ağ yapısı ile çözümler elde edilmiştir.



Şekil 9: A kollarının Solidworks programında görünümü

Analizi yapılan parçaların büyük bölümünün alüminyum gibi izotropik malzemeler olmasının yanı sıra aracın süspansiyon sisteminde A kollarında karbon malzemeden yapılmış ara kollar da yer almaktadır. Bu durum, malzemenin özelliklerinin bilgisayar ortamında modellenmesinin izotropik malzemelerden farklı olmasına neden olur. Bu bilgiler ve belli kabuller neticesinde malzeme, tedarikçiden alınmış farklı yönlerdeki farklı dayanım özellikleri doğrultusunda modellenmiştir.

Tasarlanan her parça sınır koşullarına göre ayrı ayrı analize sokularak bu parçaların dayanımının yanı sıra ağırlıklarının da optimizasyonu yapılmıştır. Gerekli olan güvenlik katsayısı da dikkate alınarak tasarımlara son şekli verilmiştir. Bu analiz sonuçlarında jant gibi parçalarda 3 kg'a kadar bir iyileştirme sağlanmıştır. Sonuç olarak 156 kg civarında bir araç üretilmiştir.

8. SONUÇ

İTÜ Güneş enerjili elektrikli araç tasarım ve üretim sürecinde yapılan bu çalışmalar sırasında en önemli hedef aracın enerji verimliliğini arttırmak

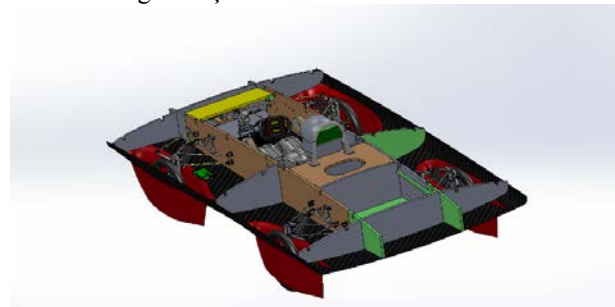
olmuştur. Bu amaçla güneş arabasının yapısal olarak kabuk tasarımından mukavemet analizlerine kadar her yapım aşamasının birbiri ile bağlantılı olması gerekir. Buna sebep, bir aşamadaki her bir çıkış parametresinin, diğer aşamaların giriş parametrelerini etkiliyor olmasıdır.

İlk olarak aracın dış yapısı ve şasisinin tasarımı ile başlayan bu süreçte, aracın aerodinamik özellikleri üzerine çalışılmış ve kuralların izin verdiği ölçüde araç dengesi ve stabilitesini de gözetenek yüksek aerodinamik verimlilikte bir araç tasarlanmıştır. Bir önceki araç (ARIBA 5) için en iyi CdA değeri 0.16 iken bu yeni araçla birlikte bu değer 0.12'ye düşürülmüştür. Ayrıca bu tasarımla araç yere yakınlaştırılarak aracın seyir stabilitesi artırılmış ve araç %15 kadar hafifletilmiştir.

Aracın sanal bir co-simülasyon ortamında modellenmesi ile (MATLAB/Simulink – IPG/CarMaker) araç sanal olarak sürülmekte, yarış pistine gidilmeden aracın stabilitesine, sürüş özelliklerine karar verilerek aracın performans ve yol tutuş kriterleri gözlenebilmektedir. Ayrıca aracın herhangi bir parametresinin değişimi ile olan enerji tüketimi de yapılan modelleme sayesinde hesaplanabilmektedir. Söz konusu olan co-simülasyon ortamından yararlanılarak, aracın tahrik motoru adedine ve bu motorun yerleştirileceği tekerleğe karar verilebilmiştir.

MSC/ADAMS yazılımında araç tekerlek asılış sisteminin kinematik analizi yapılmıştır. Çift lades kemikli tipteki asılış sisteminde parametre etütleri yapılarak, araç özellikleri, yerleşim ve ağırlık iyileştirilmeye çalışılmıştır. Aracın direksiyon sisteminin tasarımı için gerekli çevrim oranı, tekerlek ve direksiyon simidi sapma açıları gibi parametrelerin doğruluğu elle yapılan hesaplamalardan sonra, sözü geçen yazılımda da analiz edilmiş ve sonuçların doğruluğu teyit edilmiştir, aynı zamanda belirlenen kinematik açıların sürüş dinamiğine etkisi gerçek hayatta da incelenerek elde edilen sonuçlar teyit edilmiştir.

ANSYS yazılımda belli sınır şartları altında tasarımların dayanımı incelenmiştir. Aracın toplam süspansiyon sisteminin ve tahrik mekanizmasının ağırlık optimizasyonu da yapılarak aracın 4 tekerlekli olmasına rağmen ekip bünyesinde üretilen diğer 3 tekerlekli beş adet araçtan ve bu araçların içinde en hafifi olan ARIBA 5'ten yaklaşık 25kg daha hafif bir mekanik aksam üretilmesi sağlanmıştır.



Şekil 10: Aracın tasarımı tamamlanmış görünüşü

REFERANSLAR

1. <http://www.history.com/this-day-in-history/william-cobb-demonstrates-first-solar-powered-car>
2. General WSC Regulations 2013
3. Gillespie T.D. "Fundamentals of Vehicle Dynamics", SAE, 1994
4. Trzesniowski, "Rennwagentechnik", Vieweg + Teubner, 2008
5. Özer K.B., Kavsaoglu M.Ş. "Bir Güneş Arabasının En Uygun Aerodinamik Tasarımının Yapılması" Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı
6. Tamai, "The Leading Edge", Robert Bentley Publishers, 1999
7. Köksal Y.Z, Demiröz O.A, Atabay O, "Bir Güneş Arabası Yürüyen Aksam Sisteminin Geliştirilmesi ve Optimizasyonu" 6.Otomotiv Teknolojileri Kongresi, 2012
8. Reimpell, Betzler, "Fahrwerktechnik: Grundlagen", Vogel Verlag, 2000
9. Reperaturanleitung BMW 7'er Reihe", Bücheli Verlag, 1986

TEŞEKKÜRLER

Özellikle imalat sürecinde bize verdiği destekler ve parçaların tamamlanmasındaki özverili çalışmalarını için İTÜ Güneş Arabası Ekibi olarak Yıldız Kalıp A.Ş'ye teşekkür ederiz.

