

# HAFİF KARA TAŞITLARINDA GÜNEŞ ENERJİSİ KULLANIMININ ARAÇ TASARIMI VE MALZEME SEÇİMİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Tanıl ÖZKAN\*, Mehmet Z. BAYKARA\*, İlker ULUTAŞ\*, Alkan ALKAN\*, Anıl GÜROL, Mahmut A. SAVAŞ\*\*

Güneş enerjisinin kara taşıtlarında ana enerji kaynağı olarak önemi ve kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Dünya üzerindeki fosil yakıt rezervlerinin hızla azalması, öngörülebilir gelecekte bu eğilimi şüphesiz daha da artıracaktır. Alternatif kara taşıtlarında ana enerji kaynağı olarak kullanılmakta olan fotovoltaik güneş pilleri, nispeten düşük verimlilikleri ile esneklik ve kırılabilirlik gibi mekanik özellikleriyle, araç tasarımı ve malzeme seçimi üzerinde kısıtlayıcı etkiler yaratmaktadır. Bunların en dikkat çekici olanları; pillerin azami enerji absorpsiyonunu sağlamak amacıyla en kompakt ve uygun şekilde araç gövdesine yerleştirilme zorunlulukları, zaten sınırlı olan araç gücünün en etkin şekilde kullanılması amacıyla hafif malzeme seçimi ve bu seçimin tasarım ve sürücü güvenliği üzerine etkileridir. Söz konusu etkiler ve sonuçları, TÜBİTAK tarafından ilk kez düzenlenen ve 30 Ağustos 2005'te İstanbul Formula 1 pistinde gerçekleştirilecek olan "Formula G" – Güneş Enerjili Otomobil Yarışları organizasyonuna katılım amacıyla, Boğaziçi Üniversitesi dahilinde bilgisayar ortamında tasarlanan model bir araca uygulanan simülasyonlar yardımıyla tarafımızdan incelenmiştir. Ön araştırma sonuçları, ticari otomotiv sektöründe kullanılan malzeme ve tasarım özelliklerinin güneş enerjisiyle çalışan kara taşıtlarına uygun olmadığını ve alternatif yaklaşımların geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

**Anahtar Sözcükler:** Güneş Enerjisi, Taşıt Tasarımı, Malzeme Seçimi

*The use of solar energy as the main energy source for land-based vehicles is an idea which is becoming increasingly important in the world of today. The depletion of oil reserves worldwide would definitely strengthen this trend in the future. Photovoltaic cells used in alternative land-based vehicles as the main source of power are imposing many constraints on vehicle design and materials selection due to their relatively low efficiencies and their poor mechanical properties. The most prominent issues related to these concerns are the following: The optimum placement of cells on the vehicle body to ensure maximum energy absorption, light materials selection due to the relatively low amount of power produced by the cells and the effects of this selection on vehicle design and driver safety. In the present work, the mentioned issues and their effects are studied by applying computer simulations on a model vehicle created in Bogazici University as part of the preparations for the "Formula G - Solar Cars" race organized by TUBITAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey). Research results indicate that design and materials approaches used by the commercial automotive industry are not appropriate for solar land-based vehicles and that alternative approaches should be developed.*

**Keywords:** Solar Energy, Vehicle Design, Materials Selection

\* Boğaziçi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü

\*\* Prof. Dr. Boğaziçi Üniversitesi Müh. Fak. Makina Müh. Böl.

## GİRİŞ

Güneş enerjisinin kara taşıtlarında ana enerji kaynağı olarak kullanımı fikri; 1970'lerdeki OPEC krizinin ve artan enerji fiyatlarının, enerji üretim sektöründen sonraki en belirgin etkilerinin otomotiv sektöründe görülmesinin sonucu olarak ortaya çıkmıştır (1). Kuzey yarımkürenin, ısınma giderlerinin yüksek olduğu yukarı enlemlerinde bulunan gelişmiş ülkeler, bir yandan artan enerji fiyatlarının ısınma alanında yarattığı ekonomik baskıyı azaltmaya çalışırken, diğer yandan da ulaştırma sektöründe, özellikle de motorlu kara taşıtlarında enerji kullanımını en aza indirebilecek çareler üretmeye çalışmışlardır (2). Belirgin etkileri özellikle 1976 sonrası Amerikan otomotiv sektörünün gerçekleştirdiği araç tasarımlarında açıkça gözlemlenebilen bu akım, içten yanmalı motorlu araçlarda araç şasisinin hafifletilmesini, güvenlik ve çalışma kriterleri açısından uygun metalik parça ve aksamların plastik veya kompozit eşleri ile değiştirilmesini, yakıt verimliliğinin ve enjeksiyon etkinliğinin artırılmasını ve genel olarak araç boyutlarının 50 ve 60'lardaki benzer sınıf araçlarına göre büyük ölçülerde küçültülmesini hedefleyen tasarım anlayışlarının uygulanmasıyla işlerlik kazanmıştır (3,4).

Yine bu dönemde otomotiv sektöründe ortaya çıkan bir başka yaklaşım ise itki kaynağı olarak petrol türevleri yerine alternatif enerji kaynaklarının kullanımına yönelmek olmuştur (4). Elektro-kimyasal yakıt pillerinden, hidrojene, yakıt olarak bitkisel yağ kullanan motorlu araçlardan bu çalışmanın konusu olan güneş enerjili araçlara, hatta yalnız kendi dönemine göre değil, günümüze göre de oldukça futuristik sayılabilecek nükleer enerjili taşıtlara kadar bu dönemin tasarım konseptleri içerisinde kendine yer bulabilen bütün taşıt enerji sistemlerinde bu yönelimin etkilerini görmek mümkündür. Her ne kadar petrol krizinin atlatılması ve enerji fiyatlarının kriz öncesi düzeylerine dönmesi ile birlikte alternatif enerji sistemlerine yönelik bu ilgi giderek arka planda kalmaya başlamışsa da, hafif araç tasarımı, plastik ve kompozit malzemenin yaygınca kullanımı gibi uygulamalar günümüze kadar varlıklarını korumuşlar ve korumaya devam etmektedirler.

Güneş enerjisi ile çalışan kara araçları üretme fikrinin gelişimine baktığımızda, 70'lerdeki enerji krizinden sonra bu alanda en kapsamlı değişimlerin 80'lerde giderek ivme kazanan çevreci yaklaşımlar sebebiyle yaşandığı görülmektedir (5). Kyoto protokolüne kadar uzanan

süreç göz önüne alındığında bütün endüstriyel üretim dalları gibi otomotiv sektörünün de ciddi çevre koruma düzenlemelerine tabi tutulduğu ortadadır (6,7). Ancak otomotiv sektöründeki bu düzenlemelerin endüstriyel üretim süreci dışında doğrudan ürünün (taşıtlar) belirli niteliklerini kısıtlayıcı özellikte oluşu tasarım ve araç geliştirme süreçlerini büyük oranda etkilemiştir. Bu düzenlemeler, bir yandan konvansiyonel araçlarda yakıt verimliliği, enjeksiyon etkinliği ve katalizatör sistemleri gibi karbon ve kurşun emisyonları üzerinde belirleyici rol oynayan faktörlerde iyileştirmelere gidilmesine neden olurken, diğer yandan da güneş enerjisi gibi doğa ile dost alternatif enerji kaynaklarına yeniden ticari ölçüde ilgi doğmasına ve bunlara yönelik gelecek planlarının yapılmasına neden olmuştur.

Otomotiv üreticilerinin giderek artan bu ilgisi, yakın gelecekte güneş enerjisi gibi bazı alternatif enerji kaynaklarının ticari araçlarda geniş ölçekte kullanımını mümkün kılacak faktörlerin başında gelmektedir. Daha şimdiden standart itki sistemleri yanında, elektrikli itki kullanan hibrid araçların piyasaya sürüldüğü ve bunların giderek daha büyük oranlarda piyasa paylarına sahip olmaya başladıkları düşünüldüğünde, güneş enerjili ticari kara taşıtlarının sahip olabilecekleri potansiyel daha iyi anlaşılmaktadır.

Türkiye'nin, 2005 yılında yapılan bir araştırmaya göre, ısısal güneş enerjisi üretiminde yılda toplam 5690 MW ile dünya dördüncüsü ve Avrupa birincisi olması (8); ülkenin, güneş enerjisi ile çalışan kara araçları üretimi gibi, güneş enerjisinin kullanıldığı ileri uygulamalarda da söz sahibi olması gerektiğini ortaya koymuştur. Bu çalışmanın amacı, şu ana kadar konu üzerinde yapılmış araştırmaları da göz önüne alarak, ana enerji kaynağı olarak güneş enerjisi kullanacak ticari bir kara aracının tasarım parametrelerini ve malzeme özelliklerini tartışmak, güneş enerjisinin araç tarafından en etkin şekilde kullanılmasını sağlayacak fikirleri tek bir çatı altında toplamaktır. Ayrıca, malzeme seçiminin yolcu ve sürücü güvenliği üzerine etkileri, model bir araca uygulanan bilgisayar simülasyonları yardımıyla bu çalışma dahilinde incelenmiştir.

## BULGULAR VE TARTIŞMA

### Güneş Enerjili Bir Kara Aracı'na Yönelik Tasarım Parametreleri :

ABD'de 80'lerin sonundan itibaren Enerji Bakanlığı'nın teşviki ile gerçekleştirilen ve güneş enerjisinin kara taşıtlarında itki kaynağı olarak kullanılmasını yaygınlaştırmayı amaçlayan 'Solar Challenge' isimli yarışmada kullanılan araç tasarımlarının incelenmesi, yaklaşık 25 yıllık bir dönem içerisinde söz konusu tasarımlarda meydana gelen değişimlerin belirlenmesi ve bu yolla güneş enerjili kara taşıtlarının tasarım parametrelerinin oluşturulması açısından oldukça yararlıdır.

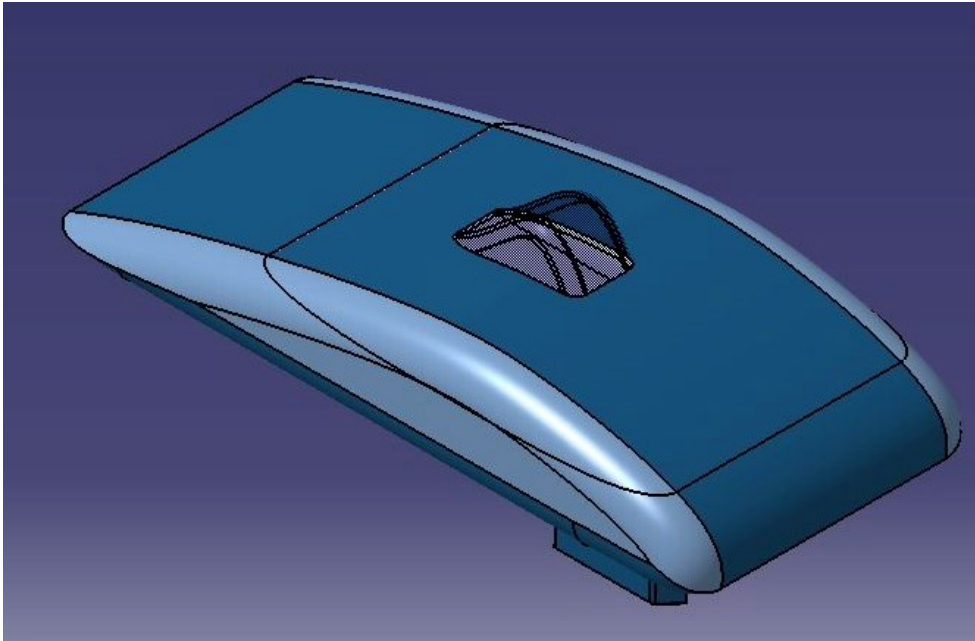
Doğal olarak, bahsi geçen yarışmada kullanılan araçların yarış amaçlı (ekonomiklikten daha çok yüksek hızlara ulaşmanın ön planda olduğu) ve tek kişilik oluşu bu inceleme sonucunda belirlenecek tasarım parametrelerinin doğrudan ticari kara taşıtlarına uygulanabilirliğini kısıtlasa da, güneş enerjisinin optimum kullanımı, hafiflik ve güvenlik gibi belirli ana tasarım unsurlarının bu araçlar için de geçerli olması, tasarım parametrelerinin belirlenmesinde böyle bir incelemeye başvurulmasının gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır.

Bilindiği gibi kara taşıtlarında kullanılması düşünülen güneş enerjisi, güneş gözesi ya da güneş panelleri denilen 'solar kollektörler' yolu ile toplanmaktadır. Atmosfer emilimine maruz kalan elektromanyetik güneş radyasyonunun başta GaAs (Galium Arsenide ) olmak üzere çeşitli yarı iletkenler yoluyla depolanabilen elektrik enerjisine çevrilmesi prensibi ile çalışan güneş gözeleri % 8-25 bandındaki verimlilikleri ile araç boyutları dolayısı ile araç tasarımı üzerinde belirleyici rol oynamaktadırlar. Güneş radyasyonunun en iyi koşullarda metrekaareye 1 kW'lık bir güç verdiği ve % 16'lık ortalama verimliliğe sahip güneş gözelerinin kullanılması durumunda ise metrekaare başına en fazla 160 W'lık bir gücün alınabileceği düşünüldüğünde, 1 beygirlik (1hp = 746 W) bir gücün güneş panelleri yoluyla alınabilmesini sağlamak amacıyla yaklaşık 5m<sup>2</sup>'lik bir yüzey alanına ihtiyaç duyulacağı anlaşılmaktadır. Otomotiv sektörünün standart normları dahilinde bu durum güneş enerjisi ile çalışacak bir kara taşıtlarının 1.765m x 2.833m ölçülerinde olmasını

gerektirmektedir (9). Araç üst yüzeyinin tümüyle güneş panelleri ile kaplanılacağı düşünüldüğünde bu durum doğrudan bugün otomotiv sektöründe kullanılan kabin ve cam tasarımlarının güneş enerjili taşıtlara uygulanamayacağını ortaya çıkarmaktadır. Toplanabilecek güneş enerjisini arttırmak amacıyla aracın yan taraflarının da güneş panelleri ile kaplanması, hem binme-inme sırasında problem yaratacağı, hem de getireceği ek üretim ve montaj giderlerinin elde edilebilecek ek güç kazanımlarına oranla yüksek olması gibi nedenlerle uygun görülmemektedir. Güneş enerjisinin optimum kullanımına yönelik olarak belirlenebilecek bir başka tasarım parametresi ise seçilecek olan panel tipine göre şekillenecek olan araç üst yüzeyinin eğimliliğidir. Esnek (flexible) tip ya da esnek olmayan (rigid) tip şeklinde sınıflanabilecek güneş panelleri kullanılacak tipe göre çeşitli avantaj ve dezavantajlar sergilemektedirler. Esnek tiplere göre daha yüksek verimliliklere ve daha düşük fiyatlara sahip olan esnek olmayan tip paneller tümüyle düz ya da çok düşük eğime sahip bir üst yüzey gerektirmeleri dolayısı ile üretim maliyetlerini oldukça düşürmelerine karşın, araç aerodinamisi ve kabin tasarımındaki kısıtlayıcılıkları ile birlikte değerlendirilmek zorunda kalmaktadırlar. Oldukça eğimli yüzeylere dahi uygulanabilirlikleri sayesinde hem

araç aerodinamisi hem de kabin tasarımı üzerinde olumlu etki yaratabilecek esnek tip güneş panelleri ise görece düşük verimlilikleri ve yüksek maliyetleri ile pazara yeni girdiklerinde fiyat avantajına da sahip olması gereken güneş enerjili kara taşıtları için uygun bir seçim olarak belirmemektedirler. Ancak güneş panelleri teknolojisinde yaşanabilecek gelişmeler sayesinde esnek tip panellerde beklenebilecek verimlilik artışları ve fiyat düşüşleri bu tip panellerin de gelecekte ciddi biçimde kullanılabilmesini sağlayacaktır.

Gerek 'American Solar Challenge' gerekse 'Austrian Solar Challenge' yarışmaları dahilinde tasarlanan güneş enerjili araçların genel tasarım özellikleri incelendiğinde, araç aerodinamisinin göz önünde bulundurulması gereken ana tasarım unsurları arasında yer aldığı görülmektedir. Elbette yarış araçlarında oldukça kritik bir hız faktörü olarak karşımıza çıkan yapısal aerodinaminin, ticari ölçekte üretilmesi beklenen güneş enerjili kara taşıtlarında bu derece kritik bir rol oynamayacağı açıktır, ancak başta sürüş güvenliği olmak üzere, yol tutuş ve kullanım süresi gibi aracın bütünsel performansı yönünden belirleyici rol oynayan pek çok faktörün, araç gövdesinin aerodinamik özellikleri ile yakından ilişkili oldukları düşünüldüğünde yine de aerodinamik tasarım parametrelerinin doğru



**Şekil 1.** Boğaziçi Üniversitesi Güneş Arabası Takımı Tarafından Tasarlanan Güneş Arabası Modeli

şekilde belirlenmesinin önemi anlaşılmaktadır. Bu anlayışla, Boğaziçi Üniversitesi Güneş Arabası Takımı tarafından tasarlanan model bir araç Şekil 1'de görülmektedir.

TÜBİTAK tarafından düzenlenen 'Formula-G' isimli güneş arabaları yarışmasına katılmak üzere Boğaziçi Üniversitesi Güneş Arabası Takımı'nın CATIA katı modelleme programı ile gerçekleştirdiği çeşitli güneş enerjili yarış arabası tasarımları üzerinde 'FLUENT' programı ile modellenen akışkan ortamlarında yapılan testler, güneş enerjili kara araçlarının yapısal aerodinamilerinde belli başlı iki temel eğilimin geçerli olduğunu ortaya koymuştur. Araç boyutları, dış gövdenin eğimlerine ve lokal bazı değişimlere (örneğin tekerlek yuvalarının pozisyonları ya da tekerlek kalınlıkları) bağlı olarak bazı sapmalar göstermekle birlikte, genel olarak 60km/h'den düşük seyir hızlarında aşırı bir hava direnci yaratmayacak şekilde gövdenin seyir yönüne dik kesit alanının küçük tutulması ve eğimlerinin aşırılıklar göstermemesi, hatta geçişlerin kesik açılarla yapılması aerodinamik açıdan uygun görülmüştür. Bu bağlamda şehir içi kullanıma yönelik olarak tasarlanan güneş enerjili taşıtların üretim maliyetleri de göz önüne alınarak düz hatlara sahip, kesit alanına yönelik kaygılardan ötürü kompakt ve üst gövdelerinin tümüyle düz bir biçimde tasarlanacağı öngörülebilir. Böyle bir tasarımda doğal olarak pahalı esnek paneller yerine esnek olmayan (rigid) panellerin kullanılacağı tahmin edilebilir.

Akışkan simülasyonları yoluyla elde edilen bir diğer sonuç ise 80km/h'den yüksek hızlarda seyir yönüne dik kesit alanının küçük tutulması yanında, gövde profili ve bu profilin hatlarının oluşturulmasında kullanılan geçişlerdeki sürekliliğin taşıdığı önemdir. Kanat profiline benzer profile sahip araçların her ne kadar alt gövdedeki hava akımının yaratacağı kaldırma etkisinden dolayı yol tutuş performanslarının belirli oranda azalabileceği öngörülmekteyse de, hız karakteristikleri açısından yaratacakları olumlu etki tasarımların bu yöne kaymasına neden olacaktır. Bu bağlamda şehirlerarası kullanıma yönelik olarak geliştirilmesi beklenen güneş enerjili taşıtların yuvarlak hatlı, kompakt ve belirli profillere göre oluşturulmuş eğimli bir üst gövdeye sahip olacak şekilde tasarlanacakları anlaşılabilir. Belirtilen tasarım parametrelerinin panel tiplerinin seçiminde yaratacağı etki

ise kolayca şekil alabilen ancak, görece düşük verimliliğe sahip esnek güneş panellerinin kullanılması şeklinde olacaktır. Bu durum kaçınılmaz bir biçimde sürüş güvenliğinden ödün vermeden aracın genel ağırlığının azaltılması yönünde bir yaklaşımı doğuracaktır.

Amerika ve Avustralya'da gerçekleştirilen güneş enerjili araba yarışlarının bu tarz araçların tasarım parametrelerinin belirlenmesi konusunda yaptıkları en büyük katkı kuşkusuz sürüş güvenliği ve ergonomisine yönelik parametrelerin oluşturulmasında kullanılabilecek bir veri tabanını teşkil etmeleridir. Yaklaşık 20 yıl boyunca farklı tasarımlarla yarışmalara katılan onlarca takım, geliştirdikleri araçlarda sürüş güvenliği ve ergonomisine yönelik o kadar farklı tasarımlara yer vermişlerdir ki, bu durum günümüzde bu parametrelerin oldukça kesin bir biçimde belirlenmesini mümkün kılmaktadır. FIA (Uluslararası Otomotiv Sporları Federasyonu) tarafından belirlenen güvenlik kriterlerine göre tasarlanan bu araçların güvenlik standartları, IAMA (Uluslararası Otomotiv Üreticileri Birliği) standartlarının üzerindedir, dolayısıyla referans değerler olarak kabul edilmeleri sürüş güvenliği açısından olumlu olacaktır.

Tarafımızdan yapılan incelemeler, günümüze kadar gelen süreç içerisinde güneş enerjili kara taşıtlarının sürüş güvenliğinin sağlanmasına yönelik olarak iki farklı tasarım yaklaşımının geçerli olduğunu ortaya koymaktadır. Otomotiv sektöründeki temel gövde yapısal güvenlik yaklaşımının hakim olduğu birinci yaklaşım, araçların güneş panellerinin yerleştirildiği ve güvenlik açısından herhangi bir katkısı olmayan dış kabuklarının altına çelik ve benzeri metalik alaşımlardan taşıyıcı ve darbe dayanımı fazla aynı zamanda çarpma anında enerji emilimi yüksek bir kafes sisteminin yerleştirilmesine dayanmaktadır. Sürüş güvenliği açısından gerekli kriterlere tümüyle uygunluk sergileyen bu yaklaşım, yoğun metalik malzeme kullanımı ve gövdenin tümüne yerleştirilme zorunluluğu gibi nedenlerle araç ağırlığı üzerinde olumsuz etkilere neden olmakta ve güneş arabaları gibi zaten düşük itki güçlerine sahip olabilen araçlara uygun bir nitelik taşımamaktadırlar. Bütün bu etmenler söz edilen tekil güvenlik yaklaşımını giderek daha az tercih edilmesine neden olmaktadır.

Giderek artan bir biçimde tercih edilen güvenliğe yönelik diğer tasarım yaklaşımı ise gövdenin tümüne

yayılmış metalik bir kafes yerine iki aşamalı bir güvenlik sistemi kullanmaktır. Bu yaklaşımda aracın dış kısmı (kabuğu) ve gövdesi tek bir parça olarak ayrıntılarına bu çalışmanın malzeme seçimi ile ilgili kısmında değinildiği biçimde darbe dayanıklılığı yüksek hafif kompozit malzemeden monokok (monocoque) gövde şeklinde üretilmekte ve sadece sürücünün bulunduğu kesim çelik ve benzeri metal barlarla çevrelenmektedir. 'Tabutlama' (coffining) olarak adlandırılan bu yaklaşım (10) çarpma esnasında oluşabilecek yapısal şokların monokok gövde üzerinden emilmesini ve bu sırada metalik 'tabutun' sürücü ve yolcuların hasar görmesini engelleyecek şekilde davranmasını ön görmektedir. Güvenlikten ödün vermeden hafif bir araç tasarımını olanaklı kılan bu yaklaşım, itki gücüne uygunluk ve üretim maliyetlerinin düşüklüğü yanında daha esnek bir gövde tasarımına olanak sağlaması gibi nedenlerle ticari ölçekte üretilmesi beklenen güneş enerjili kara taşıtları için daha uygundur.

#### Güneş Enerjili Bir Kara Aracı İçin Malzeme Seçimi :

Güneş enerjisi kullanımı, hafif kara araçlarında kullanılacak olan malzemeleri önemli ölçüde etkilemektedir. Bunun başlıca nedeni, verimlilikleri teknik kısıtlamalar nedeniyle belirli sınırlar içerisinde kalmak zorunda olan güneş pillerinin üretebilecekleri itici gücün, içten yanmalı motorlarla karşılaştırılınca oldukça düşük kalması ve bu nedenle toplam araç ağırlığının öneminin oldukça artmasıdır. Bu nedenle, yalnızca güneş enerjisi ile çalışması planlanan bir kara aracı için malzeme belirlerken, göz önüne alınması gereken en önemli etken malzemenin ağırlığıdır. Günümüzde seri halde üretilen motorlu hafif kara araçları göz önüne alındığında, malzeme seçiminde "ağırlık" dışında "sürücü ve yolcu güvenliği" ve "üretim masrafları"nın da ön plana çıktığı görülmektedir. İçten yanmalı motorların sağladığı görece yüksek itiş gücü; araç üreticilerine, gerektiğinde aracın güvenlik özelliklerini iyileştirmek amacıyla ağırlıktan belirli sınırlar çerçevesinde feragat etme rahatlığını vermektedir. Ancak belirtilen sebeplerden dolayı aynı rahatlık, güneş enerjisiyle çalışacak bir araç dizayn ederken ortaya çıkmamaktadır. Bu düşünceden hareketle, tasarlanacak güneş enerjili aracın malzeme seçimini yaparken güvenlik ve ağırlık arasında en iyi dengeyi kurmak gerekmektedir.

Aracın ana mekanik aksamını oluşturan malzemelerde var olan standartlardan sapmak, bazı özel durumlar dışında, hem tasarım hem de teknik açıdan önemli karışıklıklara yol açacağından, hafif malzeme seçimi söz konusu olunca, asıl olarak aracın üç kısmı göz önüne alınmalıdır: İç kısım, Yapısal Elemanlar ve Araç Gövdesi.

İlk bakışta gözden kaçabilse de; iç kısım, bir kara aracının toplam ağırlığının göz ardı edilemez bir parçasını oluşturmaktadır. Nitekim, birçok motorlu kara aracı üreticisi de son 10 senedir yakıt tüketimini azaltmak amacıyla araç iç kısmı ağırlıklarıyla ilgili önemli adımlar atmışlardır ve atmaya devam etmektedirler (11). Güncel verilere göre tipik bir sedan otomobilin iç kısım ağırlığı, hafif malzeme kullanımıyla 30 - 40 kg kadar hafifleyebilmektedir. Benzer sonuçların güneş enerjisi ile çalışan bir araçta da gözlemlenmesi şaşırtıcı olmayacaktır.

Araç iç kısmında hafif malzeme kullanımından en çok etkilenecek yerler koltuk gövdeleri ve kontrol panelinin temelini oluşturup, aracın A-sütunları boyunca ilerleyen "cross-car beam" dir. Birçok uygulamada standart çelikten imal edilen bu elemanların, yoğunlukları çeliğin sırasıyla 3'te biri ve 4'te biri olan (yaklaşık değerler) hafif alüminyum ve magnezyum alaşımlarından imal edilmeleri sonucu iç kısım ağırlığının cross-car beam'de yaklaşık 10 kg, koltuk başına ise 1 ila 2,5 kg azalması ihtimal dahilindedir (11). Alüminyum - Magnezyum alaşımlarının etkili olabileceği bir başka eleman ise aracın tekerleridir (12). Halen yarış araçlarında kullanılmakta olan magnezyum ve alüminyum alaşımlı tekerlerin güneş enerjili araçlarda kullanılması, düşük ağırlıkları nedeniyle isabetli olacaktır.

Otomotiv endüstrisinde 1970'lerdeki petrol krizini takiben ortaya çıkan ve halen devam eden (13), araç ağırlığını azaltmaya yönelik önemli eğilimlerden biri de aracın iç kısmında ve yapısal elemanlarında çelik yerine polimer malzemeler (plastikler) kullanılmasıdır. Şu an itibarıyla bu eğilimin tepe noktasına ulaştığı ve bir duraklama dönemine girdiği kabul edilse de, günümüzde piyasaya sürülen hafif kara araçlarının ağırlıklarının ortalama % 14'ünün (120-160 kg) plastiklerden oluştuğu bir gerçektir (14). Bu yaklaşımın güneş enerjisi ile çalışması planlanan bir araca daha da yoğun bir şekilde

uygulanmasının araç ağırlığı açısından getireceği avantajlar açıktır. Polimer malzemelerin hafif kara taşıtlarında şu ana kadar uygulandığı alanlar kapı kolu, panelleri, direksiyon gövdesi gibi iç kısım aksesuarlarını; tamamen plastikten oluşan modüler kapılar ve tavanlar gibi yapısal elemanları ve hava çekme manifoldları, cam sileceği motoru gövdesi, jant kapakları veya fren hidroliği haznesi gibi mekanik aksam parçalarını kapsamaktadır. Uygulamaların çoğunda, cam fiberler tarafından desteklenen naylon matriksli polimer kompozitler kullanılmaktadır. Plastikten üretilen elemanlar, çelikten üretilenlere göre neredeyse yarı yarıya hafif olmakta, ayrıca üretim masraflarını da azaltmaktadırlar (15). Polimer malzemelerin, hafif kara araçları için bir diğer ilginç uygulaması ise yan ve arka camlarda görülmektedir. Polikarbonat (PC) malzemeden üretilen saydam plastikler arka ve yan camlarda kullanıldıklarında, bu elemanların ağırlıklarını gözle görülür miktarda azaltmaktadırlar. Ancak, standart cama göre daha zayıf mekanik özelliklere sahip olan polikarbonat'ın, sürüş sırasında ani darbelere maruz kalan ön cam için kullanılması mümkün değildir. Sürüş güvenliğinden ödün vermeden ön camın ağırlığını düşürmek amacıyla, iki ince cam tabakası arasına polikarbonat bir kat yerleştirilmekte, bu şekilde oluşturulan kompozit malzeme, mekanik özelliklerde belirgin bir kayba uğramaksızın ön camın ağırlığını yarıya indirmektedir (14). Güneş enerjili bir araçta, bahsi geçen

uygulamalardan, yapısal elemanlara ve iç kısma yönelik olanlardan tümünün; mekanik aksama yönelik olanlardan ise aracın mekanik yapısına uyacak olanların kullanılması mümkündür. Aşağıdaki tabloda, güneş enerjili bir kara araçta, araç gövdesi hariç olacak şekilde, kullanılabilecek hafif malzemeler ve olası kullanım alanları özetlenmiştir.

Malzeme seçimi ile ilgili şu ana kadar olan tartışma; yapısal elemanlar, araç iç kısmı ve kısmen mekanik aksam göz önüne alınarak yapılmıştır. Ancak, bir kara aracının toplam ağırlığının belirgin bir parçasını oluşturan ve güvenlik açısından da en büyük önemi arz eden kısmı araç gövdesidir. Yakın gelecekte yaygınlaşmasına kesin gözüyle bakılan (14) modüler yaklaşımlar göz önüne alındığında, araç gövdesinin artık tek bir parçadan ve malzemeden oluşma zorunluluğu kalmasa da onu oluşturan malzeme, güneş pillerinden elde edilen sınırlı miktardaki enerjiyi mümkün olan en az seviyede harcayacak kadar hafif, ancak herhangi bir çarpışma anında yolcu ve sürücülerin güvenliğini koruyacak kadar da sağlam ve dayanıklı olmalıdır. Bu bağlamda, araç gövdesi malzemesi olarak iki aday ortaya çıkmaktadır : Cam-Fiber Destekli Polimer Kompozit'ler (CFP) ve Karbon-Fiber Destekli Polimer Kompozit'ler (KFP).

İlk olarak 1935 yılında geniş çapta üretimine başlanan Cam-Fiber Destekli Polimer Kompozit malzemeler, günümüzde yarış arabaları ve sürat teknelerinde araç

**Tablo 1.** Güneş Enerjili Bir Kara Aracında Kullanılabilecek Hafif Malzemeler ve Olası Kullanım Alanları

Malzeme	Yaklaşık Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Olası Kullanım Alanı
Karbon Çeliği	7900	Konvansiyonel kara araçlarında gövde, yapısal elemanlar ve mekanik aksam
Alüminyum Alaşımları	2700	Koltuk Gövdeleri, Yapısal Elemanlar, İç Kısım Aksesuarları, Tekerler
Magnezyum Alaşımları	1700	Koltuk Gövdeleri, Yapısal Elemanlar, İç Kısım Aksesuarları, Tekerler
Polimer (Naylon veya Polikarbonat)	1100	Kapı İç Panelleri, Yan ve Arka Camlar
Cam Fiber Destekli Polimer (Polikarbonat, 40% fiber hacmi)	1520	Jant Kapakları, Fren Hidroliği Haznesi , Modüler Tavan ve Kapılar

gövdesi malzemesi olarak sıklıkla kullanılmaktadırlar (16). Cam-Fiber Polimer Kompozit'lerin ana avantajları şu şekilde sıralanabilir: Nispeten düşük maliyet, düşük ağırlık, buna karşın yüksek sertlik (elastik modül) ve yüksek çekme mukavemeti. CFP malzemelerinin sahip oldukları bu özellikler genel anlamda; cam fiberlerinin uzunlukları ve çapları (amaca göre fiber uzunlukları değişse de, genel kabul gören çap uzunluğu 10µm civarındadır), matriks malzemesi olarak kullanılan polimerin mekanik özellikleri ve cam fiberlerin, polimer matriksle bağlantı noktalarının ne kadar sıkı olduğuna bağlı olsa da günümüzde CFP teknolojisi oldukça ilerlemiş ve "termosetting" haricinde hem sert, hem de tok olabilen "termoplastik" özellikli polimerlerin de matriks malzemesi olarak kullanıma girmesiyle (16), üretim süreci oldukça güvenilir sonuçlar veren bir konuma gelmiştir. Cam fiberlerin polimer matriks'i desteklemesi, kompozite uygulanan gerilimin başarılı bir şekilde zayıf sertlikteki polimer matriksinden yüksek sertlikteki fiberlere transfer edilmesi prensibine dayanmaktadır. Cam fiberler, kompozitin sertliğini ve çekme mukavemetini bu şekilde artırırken, polimer matriks ise kompozite, özellikle çarpışmalarda ihtiyaç duyulan elastikiyeti sağlamaktadır. Ancak, fiberler büyük oranda kendi doğrultularındaki gerilimleri taşıyacaklarından, birbiriyle dik açı yapan fiber katmanlarının kullanılması, her yönden gelebilecek darbelerle karşı hazırlıklı olmak için gerekli bir uygulamadır.

Güneş enerjili arabalarda kullanılması olası bir diğer gövde malzemesi ise karbon-fiber destekli polimerlerdir, (KFP). KFP'ler ilk olarak 1966 yılında İngiltere'de keşfedilmelerinin ardından (17), yüksek maliyetleri nedeniyle ilk olarak, maliyetin ağırlık kaybından daha az önemli olduğu havacılık ve silah sanayii gibi sektörlerde kullanım gördüler. Ancak, geçen zamanla beraber üretim maliyetlerinin azalması ve yeni üretim tekniklerinin gelişimiyle, KFP malzemeler spor ekipmanlarında ve özel yarış arabalarının gövdelerinde de görülmeye başladılar. 1970'lerin başında araç gövdesinin kilit noktalarında KFP kullanımıyla ağırlığı önemli derecede düşürülen bir yarış aracının ünlü Le Mans yarışını üst üste iki kere kazanması (17), bu malzemenin kara taşıtlarında kullanımının getireceği avantajları açıkça ortaya koymaktadır. İçinde buldukları polimer matriksi destekleme mekanizmaları

temelde CFP'lerle aynı olan KFP malzemeleri öne çıkartan özellikleri, karbon fiberlerinin cam fiberlerine göre yaklaşık dörtte bir oranında daha hafif olmaları (18), buna karşın cam fiberlerden de yüksek olan sertlikleri ve yorulmaya karşı olan dayanıklılıklarıdır. Sertlikleri sayesinde aynı büyüklükte gerilimlerle karşılaştıklarında, cam fiberlere göre daha az gerinen karbon fiberleri, bu sayede polimer matriksle bağlantı noktalarında yırtıklar oluşmasını büyük ölçüde engellemekte, kompozitin yorulma özelliklerini güçlendirmektedir. Korozyon göz ardı edildiği takdirde, yüksek sıcaklıklarda da özelliklerini koruyan karbon fiberlerin, güneş enerjili otomobil gövdesinde kullanılmalarını sorun haline getirecek tek dezavantajları, yüksek sertlikleri nedeniyle çarpışma anında genellikle CFP'lerden daha kırılğan bir özellik taşımalarıdır (17). Güneş enerjili bir araçta, daha önce de değinildiği gibi, sürücü ve yolcu güvenliği büyük önem taşımakta olduğundan, böyle bir aracın, çarpışma anında darbeleri tatmin edici bir şekilde soğurabilmesi için, aracın en azından ön kısımlarının ve yolcu/sürücü kabinlerinin CFP malzemelerle, gerekirse çelik barlarla desteklenmesi gerekecektir. Kanada'da 2004 senesinde bir güneş enerjili araba yarışı esnasında gerçekleşen ve Toronto Üniversitesi'ne ait aracı kullanan sürücünün hayatını kaybetmesine yol açan üzücü kaza, hafif malzeme seçiminin, güvenliği öne çıkaracak tasarımlarla desteklenmesinin önemini bir kez daha ortaya koymaktadır (19).

Tablo 2'de , epoksi polimer matriksli, hacmen %60'ı fiberlerden oluşan, CFP ve KFP malzemelerin bazı mekanik ve fiziksel özellikleri verilmiştir.

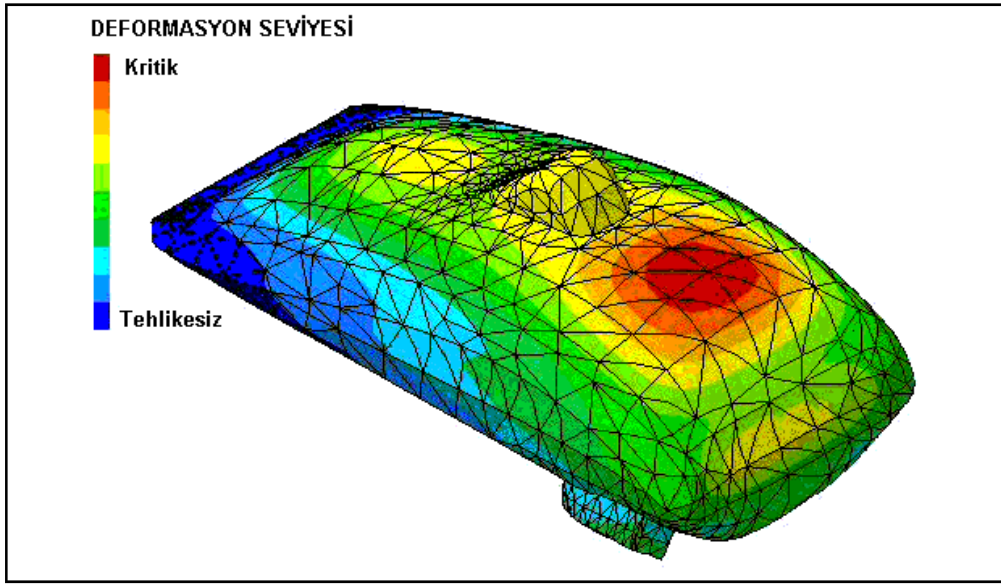
**Tablo 2.** Cam-Fiber ve Karbon-Fiber Destekli Polimer Kompozitlerin Bazı Mekanik ve Fiziksel Özellikleri (Epoksi anafazı içerisinde hacmen % 60 fiber içermektedirler) (16-18)

Mekanik/Fiziksel Özellik	CFP	KFP
Yaklaşık Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	2100	1600
Elastik Modül (GPa)	45	145
Çekme Mukavemeti (MPa)	1020	1240
Maksimum Çekme Gerinimi (%)	2,3	0,9

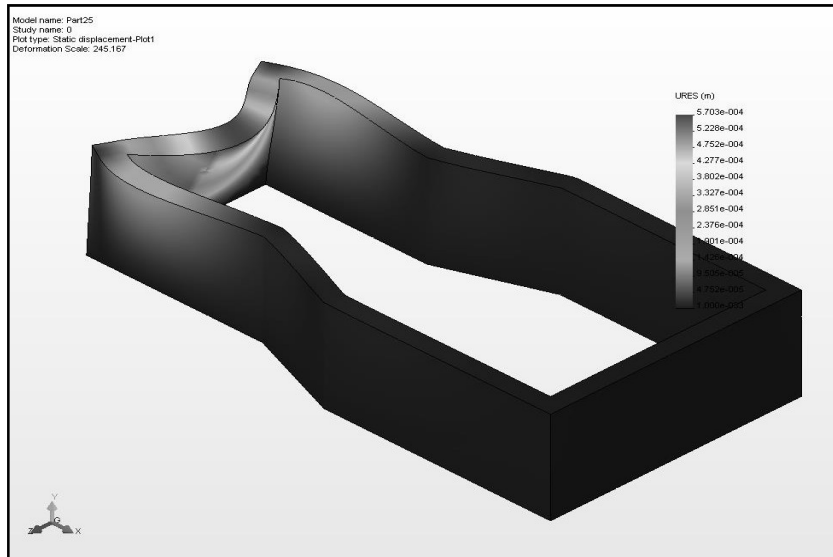
### Bilgisayar Simülasyonları :

Bu çalışma kapsamında CATIA programının 'Analiz ve Simülasyon' modülü ile gerçekleştirilen çarpışma simülasyonları yardımıyla araç gövdesinde ve sürücü kabini etrafındaki kafeste oluşan gerilim ve gerinimler incelenmiştir. Model olarak Boğaziçi Üniversitesi Güneş Enerjili Araba Takımı tarafından hazırlanan araç kullanılmıştır. Hazırlanan araç temelde yarış amaçlı tasarlanmışsa da benzer sonuçlarla ticari nitelikte güneş araçlarında da karşılaşılabileceği ön görülmektedir. Çarpışma simülasyonları sonucunda CFP malzemenin yapıldığı

varsayılan araç gövdesinde ve AISI-SAE 1020 çelikten yapıldığı varsayılan koruyucu kafeste oluşan deformasyonlar aşağıda görüldüğü gibidir. Çarpışma simülasyonları sırasında darbenin doğrudan ön cepheden geldiği ve darbe kuvvetinin ön cepheye dağılmış olduğu kabul edilmektedir. Şekil 2'de görüldüğü gibi belirtilen çarpma etkisinin, gövdenin tümüne yayılmakla birlikte en fazla aracın burnu ile sürücü kabininin cam paneli arasındaki kesimde yoğunlaştığı fark edilmektedir. Sürücü kabini odaklı yapılan incelemede ise belirtilen çarpma koşullarında sürücü güvenliğini tehdit edecek bir deformasyonla karşılaşmadığı saptanmıştır.



Şekil 2. Çarpışma Anında Araç Gövdesinde Oluşan Deformasyonlar



Şekil 3. Çarpışma Anında Koruyucu Kafeste Oluşan Deformasyonlar



## SONUÇ

Güneş enerjili bir hafif kara aracıyla ilgili tasarım parametreleri ve böyle bir araçta kullanılacak malzemeler incelenmiştir. İtici gücünün oldukça sınırlı olduğu bu tip araçlarda, temel tasarım hedefi sürücünün güvenliğinden mümkün olduğu kadar taviz vermeyerek aracı en hafif ve işlevsel hale getirmektir. Bu bağlamda, aracın tümüne yayılmış metalik bir yapı yerine gövdenin cam- veya karbon-fiber destekli kompozitlerden oluştuğu, sürücünün ise çelik bir kafesle korunduğu modüler bir yaklaşım önerilmiş; aracın ön/arka camlar ve tekerlek gibi birincil dereceden önem teşkil etmeyen parçalarıyla da ilgili alternatif yaklaşımlar gözden geçirilmiştir. Belirtilen tasarım parametreleri ile uyumluluk gösteren bir bilgisayar modeline CATIA v5 programı yardımıyla çarpışma simülasyonları uygulanmış, elde edilen veriler ön cepheden gerçekleşen çarpışmalar için sürücü ve yolcu güvenliğinin önerilen tasarım ve malzeme özellikleri göz önüne alındığında ciddi bir tehdit altında olmadığını göstermiştir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, güneş enerjili araçların geniş çaplı kullanımının ticari ölçekte yaygınlık kazanmasının önünde en azından güvenlik açısından ciddi engeller bulunmadığı, ancak standart fosil yakıtlı araçlarla rekabet edebilmeleri için gerek üretim masrafları gerekse enerji depolanması ve kullanımı gibi konularda ciddi ilerlemelerin sağlanması gerektiği tespit edilmiştir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmada kullanılan güneş arabası modeli için, bir bütün olarak Boğaziçi Üniversitesi Güneş Arabası Takımı'na, sunulan teknik imkanlar için Boğaziçi Üniversitesi Makina Mühensiliği Bölümü'ne ve Boğaziçi Üniversitesi Dekanlığı'na, Boğaziçi Üniversitesi Güneş Arabası Takımı'na sağlanan maddi destek için TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

## KAYNAKÇA

- HAGGARD; S.** The International Political Economy and the Developing Countries, Edward Elgar Publishing Company, 1995.
- CLARK; P.** Umut ve Zafer - Britanya 1900-1990, Metis Yayınları, 1999.
- BROWN; J. C., ROBERTSON; A. J., SERPENTO; S. T.,** Motor Vehicle Structures: Concepts and Fundamentals, Butterworth-Heinemann Publishing, 2002.
- BASALLA; G.,** Teknolojinin Evrimi, Tübitak Bilim Yayınları, 1998.
- CROALL; S., RANKIN; W.,** Çizgilerle Ekoloji, Milliyet Yayın A.Ş., 1994.
- ROSITA; M.** Kyoto Accord, Desrosiers Automotive Reports, 16, 19, 1-4, 2002.
- FLAVIN; C., French; H., GARDNER; G.** Dünyanın Durumu 2002 - World Watch Enstitüsü Raporu, TEMA Vakfı Yayınları, 2002.
- Hürriyet Gazetesi, Türkiye Güneş Enerjisinde AB Birincisi, 24.02.2005.
- BAUER; H.** Automotive Handbook, Society of Automotive Engineers, 2000.
- WILLIKEN; M.F., WILLIKEN; D.L.** Chassis Design: Principles and Analysis, Society of Automotive Engineers, 2002.
- BROOKE; L.** Lighten Up, Automotive Industries, 180, 5, 43-45, 2000.
- BAYKARA; M., ÖZKAN; T.** Design and Materials Selection for Wheels of a Solar Car, ME-318 Araştırma Projesi, Boğaziçi Üniversitesi, 2003.
- SHIFFLETT; D.C.** Steering Towards Plastics, Molding Systems, 58, 2, 36-38, 2000.
- OSBORNE; J.** Kill or Cure, Automotive Manufacturing Solutions Magazine, 22, 4, 71-73, 2004.
- TOLINSKI; M.** Automotive Applications Explode, Molding Systems, 56, 6, 36-41, 1998.
- LOEWENSTEIN; K.L.** The manufacturing technology of continuous glass fibres, Elsevier, 1973.
- LANGLEY; M.** Carbon Fibres in Engineering, McGraw-Hill, 1973.
- CALLISTER; W.D. Jr.** Materials Science and Engineering: An Introduction, Wiley, 2000.
- <http://www.news.utoronto.ca/bin6/040812-349.asp>