

GÜNEŞ YELKENİ VE MANYETİK YELKENİN UYDU TEKNOLOJİSİNDE KULLANIMI

Yiğit ÇAY*, Necmi Cihan ÖRGER† ve Zerefşan KAYMAZ‡

İstanbul Teknik Üniversitesi/Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, İstanbul

ÖZET

Bu çalışmada günümüzde en çok kullanılan uydu itki sistemlerine karşı alternatif olarak önerilen güneş yelkeni ve manyetik yelken tasarım konseptleri anlatılıp karşılaştırılmıştır. Yönelim belirleme ve kontrol mekanizmaları, iletişim sistemleri, uydu bilgisayarları, veri aktarım cihazları veya bilimsel ölçüm cihazlarının seçimi, bir uzay aracının görev durumunu ve gerekliliklerini oldukça etkilemesine rağmen, boyut ve maliyet açısından hangi itki sisteminin kullanılacağı mühendisler için daha önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Güneş yelkeni günümüz problemlerine henüz gerçekçi çözümler üretememiş, uzun süredir gündemde olan bir konsept iken, manyetik yelken bu bildirden de anlaşılacağı üzere oldukça yeni bir tasarım fikridir. Bu çalışmada öncelikle, uzay aracına bağlı yelken kumaşıyla Güneş'ten gelen ışınları uzay aracını ivmelendirmek için kullanan güneş yelkeni konsepti tanıtılmakta, Güneş ışığından sağlanan itki mekanizması ve gerektirdiği koşullar açıklanmaktadır. Güneş yelkeninin tarihsel gelişimi kronolojik olarak verilerek günümüzdeki yeri belirtilmiştir. Bunu takiben, manyetik yelken tasarımı açıklanmaktadır. Güneş yelkeninden farklı olarak, manyetik yelken uydu etrafında oluşturulan bir plazma küresinin Güneş rüzgarı ile etkileşimini kullanarak uyduya itki sağlamaktadır. İki konsept basit bir VÖ analiziyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar maliyet, boyut, görev ortamı kapsamı vb. açılarından değerlendirilmiştir. Bu çalışmamız yere yakın uzay ortamını bilimsel açıdan inceleyecek olan bir bilimsel küp uydu görevi çalışması için ön araştırmamızı oluşturmaktadır. Çalışmamızda sonuç olarak VÖ analizi ışığında bilimsel görev önerileri sunulmuştur.

SİMGELER

CME: Koronel Kütle Atımı (Coronal Mass Ejection)

IMF: Gezegenlerarası Manyetik Alan (Interplanetary Magnetic Field)

GRB: Güneş Radyasyon Basıncı

* Lisans Öğr., Uçak ve Uzay Müh. Böl., E-posta: cayy@itu.edu.tr

† Yüksek Lisans Öğr., Uçak ve Uzay Müh. Böl., E-posta: norger@itu.edu.tr

‡ Prof. Dr., Meteoroloji Müh. Böl., E-posta: zerefsan@itu.edu.tr

MHD: ManyetoHidroDinamik

MPS (M2P2): Manyetik Yelken [Magnetic Propulsive Sail (Mini Magnetospheric Plasma Probe)]

VÖ: Verim Ölçüsü

GİRİŞ

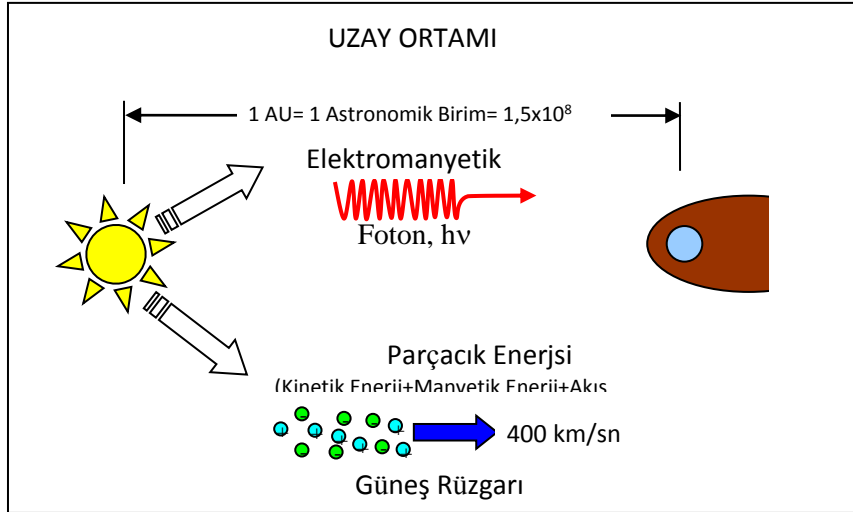
Uydu teknolojileri geliştikçe uzay bilimleri ve ortamına yönelik uydu görevleri için daha küçük boyutlu uydu ve mikro büyüklükteki faydalı yük ve bilimsel aletlerin kullanımı, hem ekonomik açıdan hem de yer problemini azaltması nedeni ile giderek yaygınlaşmaktadır. Büyük ve maliyetli uydular yerine portatif, görev odaklı, daha kısa görev süreli, ve daha ekonomik olan küçük uyduların kullanımı tercih edilmekte ve bu şekilde daha çok bilimsel veri ve araştırma ortaya çıkarılması mümkün olmaktadır. Hatta takım halinde gönderilip uzaya yayılabilen küçük uydular, farklı noktalardan ölçümleri hızlıca yapabilmekte ve maliyeti oldukça düşürmektedirler. Bu aynı zamanda bilimsel açıdan uyduların uzayda buldukları bölgelerde hem zamansal hem de uzaysal açıdan incelemeleri daha detaylı ve hassas şekilde çıkarılmasına olanak tanımaktadır. Bu nedenle küçük uydular ve bu uyduların itki sistemleri son dönemlerde mühendislerin en çok araştırdığı konulardan biri olmuştur.

Uydularda genel olarak kullanılan kimyasal ve elektrik itki sistemlerinin küçük uydular için fazla ağır ya da masraflı olabilmesi, bu uydular için farklı itki konseptlerinin geliştirilmesini gerektirmiştir. Öyle ki, ağırlığı 20 kg'dan fazla olan bir uydunun toplam kütesinin %90'ı, 1,6 kg'lık küçük bir uydu için toplam kütenin 2/3'ü yakıt kütesidir [Lappas, 2009]. Güneş yelkeni ve manyetik yelken itki konseptleri, özellikle küçük uydular için kimyasal ve elektrik itki sistemleri yerine kullanılmak üzere geliştirilen iki yeni yöntemdir. Bu çalışmamızda bu iki yöntemi küçük uydular açısından aşağıda irdelemekteyiz.

Güneş yelkeni konsepti yakıt taşımayı gerektirmeyen bir itki konseptidir. Uyduya gerekli itkiyi güneş ışınlarından sağlamaktadır. Manyetik yelken konsepti ise uyduyu ivmelendirmek için güneş rüzgarının bir uydu etrafında oluşturulan plazma ortamıyla etkileşimini kullanır. Her iki konsept de yerde ve uzayda test edilebilmeleri açısından henüz gelişim aşamalarında. Günümüz teknolojileri ile henüz manyetik yelken yer ve uzay ortamında test edilememektedir. Ancak güneş yelkeni üzerine çeşitli projeler geliştirilmekte, araştırma laboratuvarlarında testler yapılmakta ve uzay ortamında da denenmeye çalışılmaktadır. Çalışmamız, ülkemizde ilk defa gerçekleştirilebilecek bilimsel faydalı yüklü bir güneş yelkeni ile uzay ortamının plazma ve manyetik yapısını inceleme projemizin bir parçası olup, bu iki yöntemi tanıtmaya, avantajlarını-dezavantajlarını belirleme, nicelik ve nitelik olarak karşılaştırma ve yöntemler arasında karar verme aşamasında kullanılabilecek verim analizini ortaya koymaya amaçını taşımaktadır. Güneş yelkeni ve manyetik yelkenin uzaydaki hareketini anlayabilmek için Dünya'nın manyetik alanı ile Güneş'in manyetik alanı arasındaki etkileşimi ve ilgili kavramları bilmek gerekmektedir. Bu nedenle aşağıda güneş rüzgarı ile gelen plazma bulutu ve fotonların sağladığı itki mekanizması ve bu mekanizmayı kullanan araçlar hakkındaki bilgiler ve karşılaştırmaları, içinde buldukları uzay ortamı ve ilişkili terminoloji ile kavramlar kısaca tanıtıldıktan sonra sunulmaktadır.

GÜNEŞ RADYASYONU VE GÜNEŞ RÜZGARI

Dünya'daki yaşamın ve devamlılığının ana kaynağı olan Güneş, çekirdeğindeki termonükleer reaksiyonlar sonucunda uzaya iki tür enerji göndermektedir. Şekil 1'de verilen çizim bu enerji türlerini göstermektedir.



Şekil 1: Güneş'ten yayılan enerji türleri ve uzay ortamında taşınımı

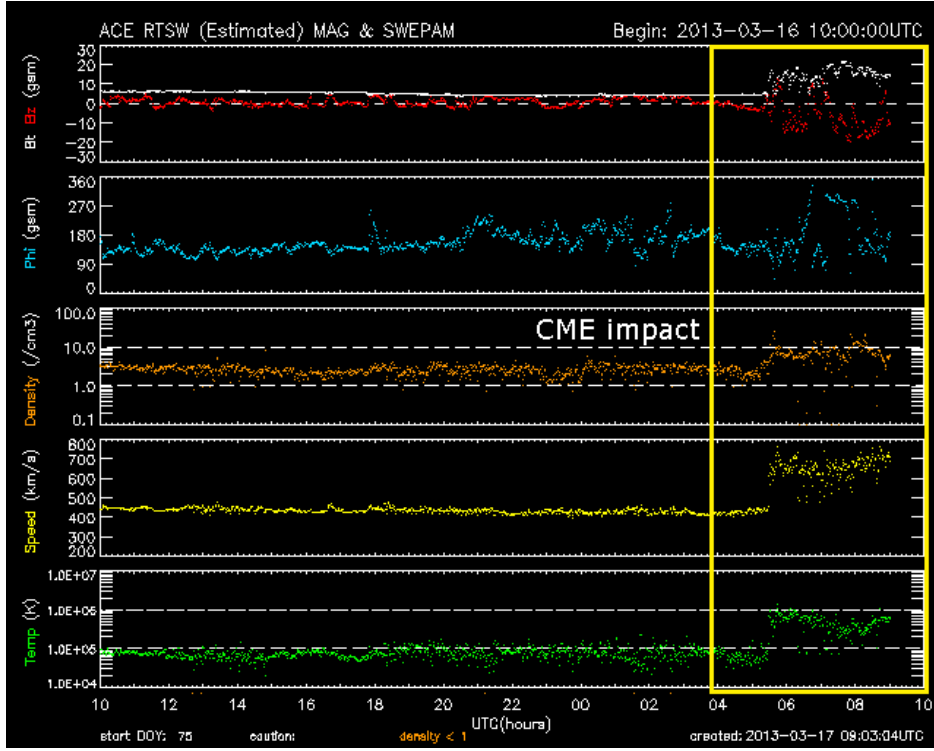
Şekil-1'deki çizimden görüleceği üzere bu iki enerji türünden bir tanesi elektromanyetik enerji olup fotonlar tarafından uzayda taşınmaktadır. Elektromanyetik enerji Dünya'ya 8 dakika içinde ulaşmaktadır. Güneş radyasyonu dediğimiz Güneş'in elektromanyetik enerjisidir ve Güneş'ten bütün dalgaboylarında yayılan foton enerjisidir. Güneş radyasyonu basıncı (GRB) da bu fotonların bir yüzey üzerinde oluşturdukları basıncıdır. Güneş'ten yayılan ikinci enerji türü ise parçacık enerjisidir ve Güneş'ten ayrılan yüklü parçacıkların uzaya taşıdığı kinetik enerji, manyetik enerji ve akış enerjisinin toplamıdır. Güneş'ten sürekli olarak ortama yayılan bu yüklü parçacıklara güneş rüzgarı adı verilmektedir. İlk defa 1958'de Eugene Parker tarafından teorik olarak oluşumu açıklanmış ve "Güneş rüzgarı" terimi ilk kez onun tarafından kullanılmıştır [Russel, 1987].

Güneş rüzgarı hipersonik bir rüzgar olup ortalama olarak 400 km/sn'lik bir hız ile uzayda hareket eder. Taşıdığı parçacıkların enerjisi çok yüksektir. Tablo 1'de güneş rüzgarına ait ortalama parametreler (hız, yoğunluk, sıcaklık, gaz basıncı, momentum) verilmektedir.

Tablo 1: Ortalama Güneş Rüzgarı Parametreleri

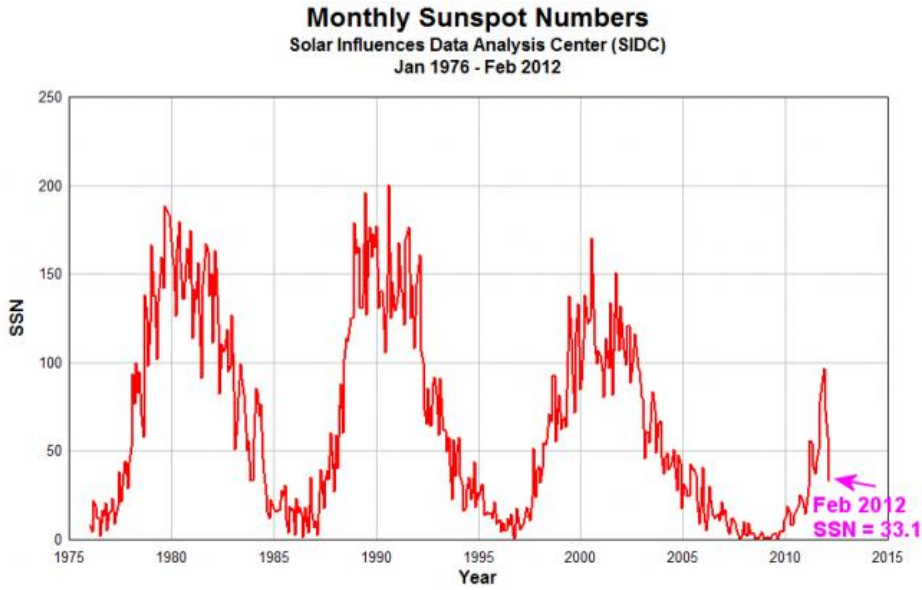
Parametre	Ortalama Değer
Hız	400 km/sn
Yoğunluk	10 \#/cm^3
Manyetik Alan	5 nT
Proton Temperature	$4 \times 10^4 \text{ K}$
Elektron	$1,5 \times 10^5 \text{ K}$
Dinamik Basınç (Momentum Flux Density)	$2.0 \times 10^{-8} \text{ erg/cm}^3 \text{ (nPa)}$
Kompozisyon	%96 Hidrojen, %4 (Helyum+iz elementler)
Ses Hızı	70 km/sn

Şekil 2'deki grafikte Lagrange noktası L1'da bulunan ve güneş rüzgarını gözlemleyen ACE uydusunun manyetik alan (B_{mag} ve IMF B_z), yoğunluk, sıcaklık ve hız değerlerinin, Mart 16, 2013 tarihinde başlayan bir günlük değişimini göstermektedir. Güneş'in aktif ve sakin olma dönemlerine göre bu parametreler değişiklik gösterir. Saat 05:30 civarında yaklaşık 700 km/sn ile hareket eden bir CME (Koronal Kütle Atımı) görülmektedir.



Şekil 2: 16 Mart 2013 günü boyunca ACE uydusunun aldığı değerler

Aktif dönemlerde Güneş'te meydana gelen güneş lekeleri, güneş alevleri ve CME'ler ortamda manyetik fırtınaların oluşmasına ve mevcut uydular üzerinde, uyduların uzayda kaybolması da dahil olmak üzere negatif etkilere ve böylelikle ulusların ekonomik açıdan kayıplarına neden olurlar. Güneş'teki aktif ve sakin dönemler belirli bir periyot ile tekrarlanırlar. Her 27 günde, 11 yılda ve 100 yılda güneş aktivitelerinin seviyesinde artışlar görülür. Genelde Güneş'in aktif veya sakin periyotta olup olmadığı güneş lekeleri sayısının değişimine bakarak belirlenir. Şekil 3'te güneş lekeleri sayılarının 11 yıllık tekrarlarını görmekteyiz. İçinde bulunduğumuz güneş döngüsü 24. döngü olup aktivitenin maksimum olduğu dönem içinde yer almaktadır. Dolayısıyla ulusların bu dönemlerdeki kayıplardan kaçınabilmesi için tedbirler alması gerekmektedir.

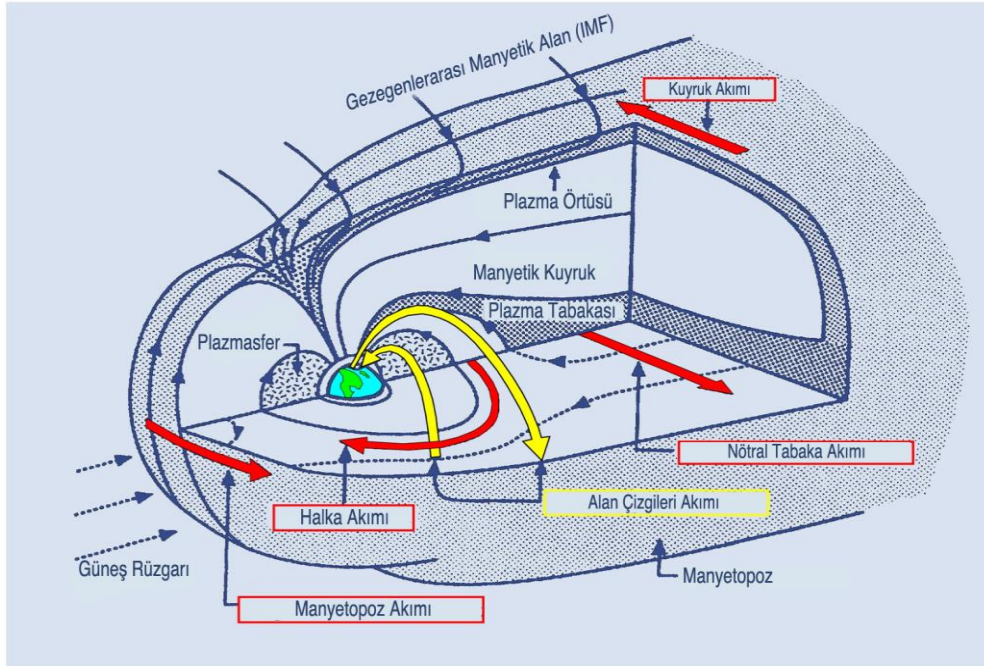


Şekil 3: 1975-2012 dönemi arasındaki güneş lekeleri sayısındaki değişimler ve 11 yıllık döngü.

MANYETOSFER VE MANYETOSFERİK BÖLGELER

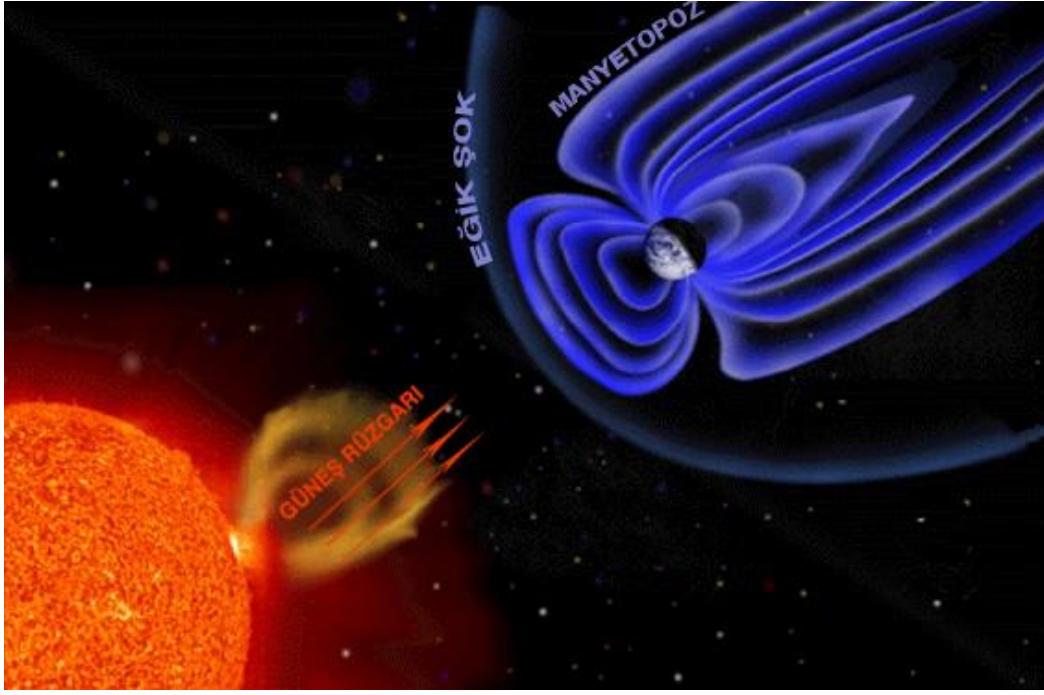
Manyetosfer, Güneş'ten devamlı olarak süpersonik hızlarla çıkan iyonize olmuş gaz veya plazmanın Dünya'nın manyetik alanını bozması ve şekillendirmesi ile Güneş'in aksi yönünde yüzlerce Dünya yarıçapı boyunca uzanan kuyruğa sahip dinamik yapıdır. Manyetosfer, Dünya'yı Güneş'ten gelen yüksek enerjili parçacıklardan koruyan bir kalkan görevi gördüğü gibi, aynı zamanda manyetik alan çizgileri üzerinde bu parçacıkları hızlandırarak ortam içindeki akışın dinamiğini de artırmaktadır. Bu iki durumun şiddeti, IMF'in yönü doğrultusunda değişmektedir. [Russel, 1987].

Manyetosfer'in ilk tasviri 1600'de Gilbert tarafından "De Magnete" şekli ile gösterilmiş, daha sonra 1883'te Balfour Stewart manyetosferin alt sınırlarını tanımlamıştır. Günümüzdeki manyetosfer modeline yakın ilk teori 1930'da Chapman ve Ferraro adlı bilim insanları tarafından geliştirilmiştir. Manyetosfer içindeki dinamik Güneş'in manyetik alanı IMF tarafından kontrol edilir. IMF'nin yönü, özellikle Bz bileşeninin kuzey veya güneyi göstermesi güneş rüzgarı ile manyetosferik manyetik alan çizgileri arasındaki etkileşimi, yani güneş rüzgarından manyetosfere parçacık girdisini, momentum akışını kontrol eder. Buna karşılık manyetosferin şekli ve boyutu güneş rüzgarının dinamik ve termal basıncına bağlı olarak oluşan normal gerilmelere ve boşluğun teğetsel gerilmelerine (sürükleme) bağlı değişmektedir. Şekil 4 güneş rüzgarı ile Dünya'nın manyetik alanının etkileşimi sonucunda oluşan manyetosferik bölgeleri göstermektedir. Manyetosferik bölgelerin ve sınırlarının belirlenmesi bilgisayar simülasyonları, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen güneş rüzgarı etkileşimi simülasyonları ve uzay aracı gözlemleri ile mümkün olmaktadır [Russel, 1987].



Şekil 4: Manyetosfer ve bölgeleri

Güneş rüzgarıyla gelen iyonlar ve elektronlar ortalama 400 km/s hızla hareket etmektedirler. Hipersonik seviyede hareket eden güneş rüzgarı manyetosfer etrafında saptırılmadan önce rüzgarın sesaltı hızı seviyelerine düşmesini sağlayan bir süreksizlik dalgasından geçmektedir. Bu elektromanyetik etkilerin neden olduğu bu süreksizlik dalgasında, hız dışında, güneş rüzgarının tüm parametreleri (yoğunluk, manyetik alan, sıcaklık, basınç) artar. Bu şok dalgası eğik şok (bow shock) olarak adlandırılmakta ve Şekil 5'teki manyetosferin önünde temsili olarak görülmektedir. Akışkanlar mekaniğinde gözlemlenen yüksek hızlarda cisimlerin akıma dönük yüzeylerinde oluşan şokları anımsatan bu eğik şokun, akışkanlar mekaniğinden farklı olarak, parçacıkların çarpışmasından çok değişen manyetik ve elektrik alanda hareket eden yüklü parçacıkların etkileşimi ile oluştuğu düşünülmektedir [Russel, 1987].



Şekil 5: Eğik şokun temsili gösterimi

Eğik şok bölgesini geçen güneş rüzgarı artık yavaşladığı için Dünyanın manyetopozu etrafından magnetohidrodinamik prensiplere uygun olarak akışına devam eder. İdeal anlamda, manyetopoz dolayısıyla güneş rüzgarının son cephesi olup, IMF'nin yönüne göre enerjisini boşalttığı bir sınır tabaka olarak tanımlanabilir. Aşağıda da anlaşılacağı üzere, Magsail konsepti manyetosferin güneş rüzgarını saptırması ilkesinden yararlanılarak güneş rüzgarından itki sağlanması olasılığını kullanan bir yöntemdir. Yöntemin başarılı olmasında, o nedenle, güneş rüzgarı-manyetosfer etkileşiminin bilinmesi önem taşır.

GÜNEŞ YELKENİ KONSEPTİ

Güneş yelkeni fikri 1924'te Fridrickh Tsander tarafından, Konstantin Tsiolkovsky'nin fikirleri doğrultusunda tanımlanmıştır [Pukniel, 2010]. Zaman içinde Lightsail-1™ gibi çeşitli güneş yelkenli küçük uydu tasarımlarının geliştirilmesi uzay teknolojilerinin gelişimine ışık tutulmuştur. Küp uydu tasarımı bu uydu Falcon-1 fırlatma aracındaki bir aksaklık nedeniyle başarılı bir şekilde yörüngeye oturtulamamıştır. Ancak böylelikle küçük uydularda güneş yelkeni uygulamaları için önemli bir adım atılmış oldu [Biddy, 2008]. 2011'de Japon Uzay Ajansı JAXA, Venüs yörüngesinde bir güneş yelkeni açmayı başarmıştır [Tsuda, 2011]. Bununla ilk defa uzay ortamında güneş yelkenli bir uydunun çalışabilirliği başarılı bir şekilde test edilmiş oldu. Bu güneş yelkeni konsepti ve ilişkili teknolojiler açısından önemli bir sonuç idi.

Güneş yelkenli uzay aracı (kısaca güneş yelkeni), Güneş ışığı dışında başka bir yakıt kaynağına ihtiyaç duymadan araca ivmelendirebilen bir uydu konseptidir. Güneş ışınlarıyla yelken yapmanın temeli momentum transferinin güneş ışınlarından sağlanması ilkesine dayanmaktadır. Güneş'ten gelen ve yansıyan ışınlar, geniş, parlak yüzeyli yelkene sahip uzay aracına momentumlarını aktarırlar ve itki sağlayan bir Güneş Radyasyonu Basıncı (GRB) oluştururlar.

GRB şiddeti Güneş'ten uzaklaştıkça azalmaktadır. GRB aynı zamanda geniş yüzeylerde ve yansıtıcılığı daha yüksek olan yüzeylerde, daha çok momentum transferi olacağından, daha fazladır. Yansıma kanunlarının geçerli olduğu bu konseptte gelen ışınların yüzey normaliyle yaptığı açı ise GRB şiddetini etkileyen önemli bir unsurdur. GRB ile itki oluşturma konsepti, nanouyduların bile daha uzun süreli bilimsel görevler yapabilmesini olanaklı hale getirmiştir.

Güneş Yelkeninin Faydaları

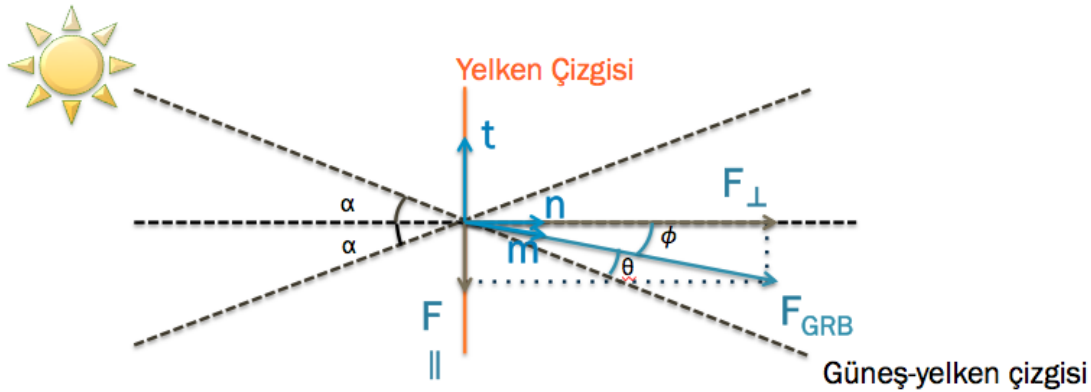
Güneş yelkeni konseptinin faydaları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Yelken malzemesi çok ince olduğundan hafif, yakıt tankı da olmadığından uzay aracının ağırlığı, dolayısıyla maliyeti oldukça düşüktür.
- Yakıtsız itki sağlanabildiğinden diğer uydulara göre çok daha uzun görevler yapılabilir. Uydu ömrünü tam belirlemek zor olsa da 10 yıllar mertebesinde bir zaman söz konusudur. Örneğin, "Interstellar Heliopause Probe" güneş yelkeni görevi için 15-25 yıl arası bir görev süresi tahmin edilmiştir [Macdonald ve McInnes, 2010].
- Günümüzün mevcut teknolojisiyle hem yerde hem de uzay ortamında test etme olanağı bulunmaktadır.
- Kuiper kuşağından (yaklaşık olarak Güneş'ten 50 AU uzakta) bile uzakta görev yapabilmektedir.

Güneş Yelkeni İtkisi

Şekil 3 güneş yelkeni itki şemasını göstermektedir. Gelen ve yansıyan ışınların oluşturduğu kuvvet toplam itki kuvvetini F_{GRB} 'i oluşturmaktadır. Şekilden de görüleceği üzere tam yansıma olduğu durumda, θ ve ϕ açıları yansıma açısı α 'ya eşittir. Yelkene dik birim vektör \hat{n} olup, yelkene dik yöndeki itkiyi (F_{\perp}) temsil ederken, yelkene paralel birim vektör \hat{t} ise yelken boyunca elde edilen itki bileşenini (F_{\parallel}) temsil etmektedir. Elde edilen itki kuvveti (F_{GRB}), birim vektör \hat{m} yönündedir ve aşağıdaki formül yardımıyla elde edilir. Formülde P, GRB'yi, A ise yelken alanını temsil etmektedir:

$$F_{GRB} = 2PA \cos^2 \alpha \hat{n} \quad (1)$$



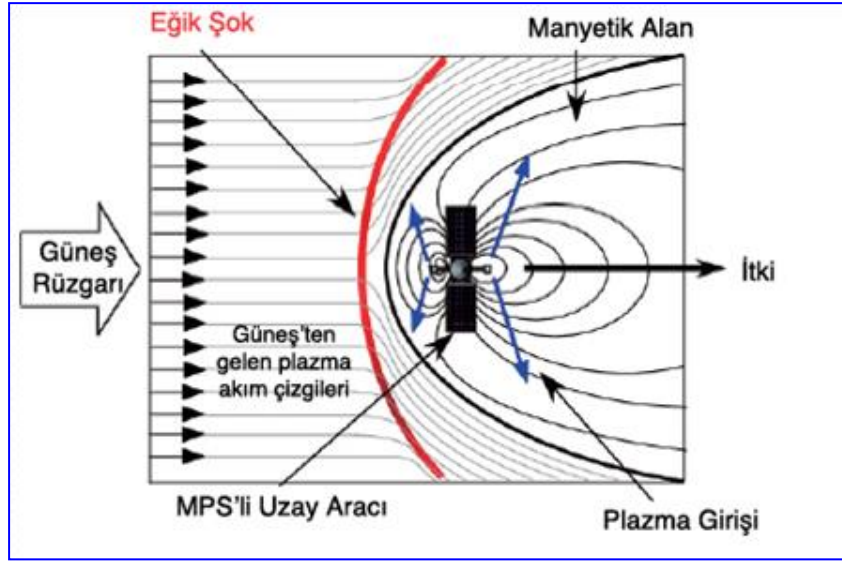
Şekil 3: Güneş yelkeni itki konsepti

GRB'den elde edilen itki devamlı olduğundan, transfer yörüngeleri içe veya dışa doğru sarmallar şeklindedir. Sağlanan itki kuvveti düşük olmasına karşın, birçok görevi tamamlayabilecek yeterliliktedir. Örneğin, 4,88 m kenarlı kare yelkeni ve 2,256 kg ağırlığı olan Solar Kite adı verilen bir güneş yelkeni için en büyük itki değeri $2,04 \times 10^{-4}$ N olduğu hesaplanmıştır [Lappas, 2009].

MANYETİK YELKEN KONSEPTİ

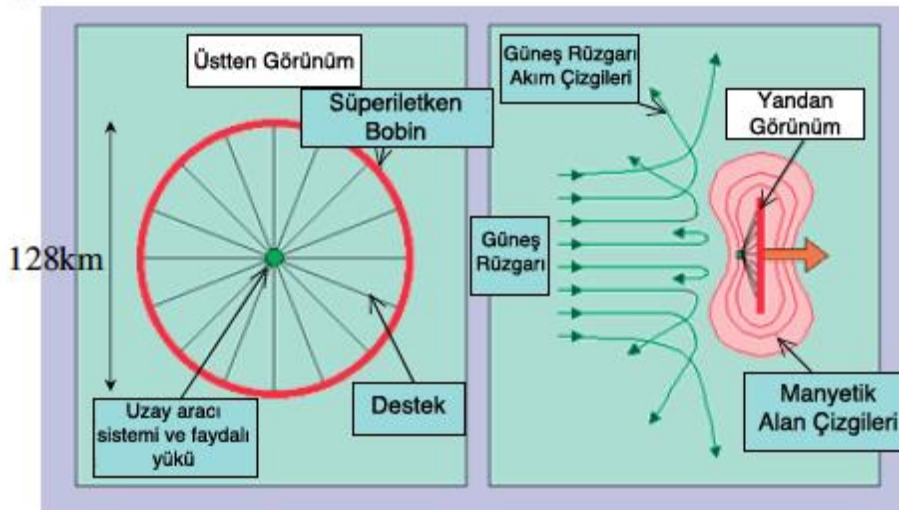
Manyetik yelken (MPS, M2P2) güneş rüzgarı momentumunu kullanarak itki sağlayan, 2000'li yıllarda ortaya atılmış, oldukça yeni bir konsepttir. Güneş yelkenisine alternatif olarak, uzaydaki seyahat zamanını kısaltmak amacı ile düşünülmüş ve ortaya atılmış; uydunun etrafında oluşturulacak yapay bir manyetosfer ile güneş rüzgarından momentum almayı hedeflemektedir

[Zübrin, 1993]. “Mini-manyetosferik plazma itkisi” de denilen bu konseptin temel prensibi uzay aracı etrafında güneş rüzgarıyla etkileşime geçerek momentum transferini sağlayacak bir plazma balonu oluşturmaktır [Winglee, 2000]. “Yapay manyetosfer” de denilen plazma balonu, plazma kaynağının ve manyetik dipolü yaratan bobinin uzay aracında taşınmasıyla oluşturulur [Mendonça, 2005]. Şekil 6 manyetik yelken konseptini şematik olarak göstermektedir. Manyetik yelkenin plazma balonu Güneş'ten uzaklaştıkça büyüyerek neredeyse sabit bir itki sağlamaktadır.



Şekil 6: Manyetik yelken itki konsepti [Winglee, 2000]

M2P2 tasarımı, MagSail üzerine bir adım daha ileri tasarım olup uzay aracının etrafında bulunan yüzlerce kilometrelik çaptaki süperonik bobinin helyosferde oluşturacağı manyetosfer gibi bir manyetik boşluğun sürüklenme kuvveti yardımıyla itki sağlanmasıyla uydunun hareketini tasvir etmektedir (Şekil 7). Bununla ilgili kısıntılar, uzay aracına sağlanan hızın maksimum güneş rüzgarı hızına kadar olması ve itki üretecek bobinin oldukça geniş bir çember yaratması gerekliliğidir. Özellikle, uydu ile taşınacak olan ve manyetik alan yaratacak olan bobinin büyüklüğü buradaki en büyük problemdir. Winglee [2000], bu çemberin yarıçapını M2P2 tasarımındaki plazma desteğiyle küçültebileceğini öne sürmüştü ve yürüttüğü deneyler sonucunda 1 ms'lik ölçüm yapabilmiş; elde ettiği deney sonucu, MHD ve kinetik model çalışmaları ile de desteklenmiştir. Ancak yine de bu şekilde sağlanacak itkinin mertebesi konusunda halen bilim insanları arasında çekinceler mevcuttur. Mevcut çalışmalar başarılı sonuçların yanı sıra pek çok da soru işareti getirmektedir.



Şekil 7: MagSail konsepti

Mini-manyetosferik plazma itkisi, etkili bir sistem olmasına karşın henüz uzay ortamında test edilememiştir. Ancak manyetik yelkenin testi için geliştirilmiş bazı MHD modelleri ve çoklu akış simülasyonları yapılmaktadır. Testler büyük plazma rüzgarı tünellerinin olduğu bir laboratuvar ortamını gerektirmektedir. Yarıçapı 100 m olan bir manyetik yelken için, 40 km'lik bir plazma balonuna ihtiyaç vardır. Bu itki konsepti küçük uydularla uzayda da denenmek istenmektedir. Mevcut araştırmalar yer testleri ve model çalışmaları şeklinde sürdürülmektedir.

KARŞILAŞTIRMA VE ANALİZ

Güneş yelkeni ve manyetik yelken karşılaştırıldığında her iki konseptin de öne çıkan özellikleri olduğu görülmüştür. Bunlar:

- Güneş yelkeni itkisi Güneş'ten uzaklaştıkça azalırken manyetik yelkenin (genişleyen plazma balonu sayesinde) itkisi neredeyse sabit kalmaktadır.
- Manyetik yelken plazma sağlayıcı bir yakıt taşımak zorundayken güneş yelkeni için böyle bir durum söz konusu değildir.
- Güneş yelkeni helyosfer içinde daha etkin kullanılabilirken, helyopoz sınırı ve sonrası görevler için manyetik yelken daha uygundur.
- Güneş yelkeni malzemeleri oldukça hafif ve az maliyetli iken manyetik yelken günümüz teknolojisiyle oldukça ağır ve maliyetli bir konsepttir.

Her iki konseptin avantaj ve dezavantajlarına dayanarak, yere yakın uzay ortamındaki polar yörüngede bilimsel görevi olan bir nanouydu tasarımı için Verim Ölçüsü (VÖ) analizi gerçekleştirilmiştir (Tablo 2). Her iki yöntemin, fizibilite, maliyet, güvenilirlik, ağırlık, keşif alanı, sağlamlık, ivmelendirme vb. gibi kriterlerini kullanarak sahip olduğu avantajlar ve dezavantajlar 0-1 arası bir sayı ile değerlendirilmiştir. Bu analiz sonucunda manyetik yelkenin puanı 1 üzerinden 0,40 iken güneş yelkeninin puanı 0,75 olarak belirlenmiştir. Analiz sonucunda, yere yakın uzay ortamında polar yörüngede bilimsel görevi olan bir nanouydu için güneş yelkeni konseptinin manyetik yelken konseptine karşı daha uygun olduğu görülmüştür. Ancak her iki konseptin de günümüzde hâlâ tüm dünyadaki çeşitli kurum ve kuruluşlarda geliştirilmekte ve olası görevler için daha çok test edilmeye çalışılmakta olduğunu vurgulamak gerekir.

Tablo 2: Verim Ölçüsü Analizi

Bir Nano uydu görevi için VÖ analizi	Ağırlık (%)	Güneş Yelkeni	Manyetik Yelken
Fizibilite	0,15	1	0
Maliyet	0,10	1	0
Güvenilirlik	0,20	1	1
Ağırlık	0,30	1	0
Keşif Alanı	0,15	0	1
Sağlamlık	0,05	0	0
İvmelendirme	0,05	0	1
Toplam	1,00	0,75	0,40

SONUÇ

Güneş yelkeni yakıtsız itki sistemi, GRB'nin parlak yelken alanından yansıması ve soğurulması ile itki kuvveti yaratan bir konsepttir. Bu bildiriye, GRB'nin hangi durumlarda nasıl değiştiği ve uydu performansına etkileri anlatılmıştır. Olası bir uydu görevinde karşılaşılan uydu sistemindeki bozukluklar, katı cisim çarpışmaları ve radyasyon etkileri ihmal edildiğinde, güneş yelkeni ile elde edilen itkinin zaman kısıtı bulunmamaktadır. Güneş yelkeni hafif ve eşdeğeri uzay araçlarına göre düşük maliyetle bilimsel görev gerçekleştirebildiğinden son dönemlerde bu konseptteki tasarımlar artmıştır. JAXA'nın uzay aracı IKAROS ile uzay ortamındaki yelken performansı görülmüştür. Bu ve benzer tasarımların yer testleri ile konseptin yeterliliği üzerine çalışmalar hâlâ sürdürülmektedir.

1920'lerde öne sürülen güneş yelkeni konseptine göre oldukça yeni bir konsept olan manyetik yelken, uzay aracı etrafında yapay bir manyetosfer oluşturarak güneş rüzgarının momentumundan faydalanarak itki sağlamaktadır. Bu itkinin sağlanabilmesi için yakıt olarak bir plazma kaynağının ve bu yakıtı belirli, etkin sınırlarda hapsederek plazma balonunu oluşturmaya yarayan manyetik dipolü oluşturan bir bobinin uydunun içine yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle konsept henüz yerde yeterli doğrulukta test edilememekte, uzayda ise büyüklük nedeni ile henüz denenememektedir. Ancak MHD modelleri ve çoklu akış ortamı simülasyonları ile konsept hızla geliştirilmeye devam etmekte; bilim insanları M2P2'nun gelecekteki derin uzay görevleri için büyük umut taşımaktadır.

Bu çalışmada, yukarıda tanımlanan iki konsept, manyetik yelkenin karakteristiğini anlayabilmek adına manyetosfer yapısı ile ilgili bilgiler verildikten sonra açıklanarak karşılaştırılmıştır. Çeşitli kriterler kullanılarak yere yakın uzay ortamındaki polar yörüngede bilimsel görevi olan bir nanouydu için yapılan VÖ analizi ile de güneş yelkeninin manyetik yelkene göre üstünlüğü sayısal olarak değerlendirilmiştir. Günümüz teknolojik koşulları ve maddi imkanlar göz önünde bulundurulduğunda, güneş yelkeni ile itki sağlama yaklaşımının daha uygulanabilir ve kolaylıkla gerçekleştirilebilir bir teknoloji olduğu görülmektedir. Bu araştırmanın uydu teknolojileri ve uzay bilimlerinde çalışan araştırmacı ve mühendisler güneş yelkenlisi veya magnetik yelkenli gibi mevcut modern teknolojilerinin uygulanmasında yol gösterici olacağını düşünmekteyiz.

Kaynaklar

- Biddy, C., 2012. Lightsail-1 Solar Sail Design and Qualification, *Proceedings of the 41st Aerospace Mechanisms Symposium*, Jet Propulsion Laboratory, May 16-18, 2012
- Funaki, I. ve Yamakawa, H., 2009. Research Status of Sail Propulsion Using the Solar Wind, *Journal of Plasma and Fusion Research SERIES*, **8**, s. 1580-1584
- Khazhanov, G., Delamere, P., Kabin, K., and Linde, T. J., 2005. Fundamentals of the Plasma Sail Concept: Magnetohydrodynamic and Kinetic Studies, *Journal of Propulsion and Power*, **21**, 853
- Lappas, V., Wie, B., McInnes, C., Tarabini, L., Gomes, L., Wallace, K., 2004. A Solar Kite Mission to Study Earth's Magneto-tail, *18th Annual Conference on Small Satellites*, AIAA/USU, SSC04-VI-3, Logan-Utah, ABD
- Macdonald, M. and McInnes, C.R., 2010. Solar sail mission applications and future advancement, *2nd International Symposium on Solar Sailing*, ISSS 2010, New York, ABD
- Mendonça, J. B., 2005. Physical Problems of Artificial Magnetospheric Propulsion, *Journal of Plasma Physics*, **71**, no. 4, s. 495-501
- Nishida, H., Funaki, I., Ogawa, H. ve Inatani, Y., 2007. Laboratory Experiment of Magnetoplasma Sail, Part 1: Pure Magnetic Sail, *30th International Electric Propulsion Conference*, IECP-2007-195
- Pukniel, A., Coverstone, V., Burton, R. and Carroll, D. 2010. The Dynamics and Control of the Cubesail Mission - A Solar Sailing Demonstration, *Advances in Space Research*, **48**, no.11, s. 1902-1910
- Pukniel, A., 2012. The Dynamics and Control of the Cubesail Mission---A Solar Sailing Demonstration, BiblioBazaar Publishing, ISBN-10: 1249057051

Russel, C. T., 1987. The Magnetosphere. *The Solar Wind and the Earth*, S. –I. Akasofu ve Y. Kamide tarafından düzenlendi, s. 73-100, Terra Bilimsel Yayınevi, Tokyo

Tsuda, Y. O. R., 2011. Flight Status of IKAROS Deep Space Solar Sail Demonstrator, *Acta Astronautica*, **69**, s. 833-840

Winglee, R. M., Slough, J., Ziemba, T., Goodson, A., 2000. Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion: Tapping the energy of the solar wind for spacecraft propulsion, *Journal of Geophysical Research*, **105**, No. 21, s. 67-77

Zübrin, R. M., 1993. The Use of Magnetic Sails to Escape from Low Earth Orbit, *Journal of the British Interplanetary Society*, ISSN 0007-094X, **46**, no. 1, s. 3-10