

## Elektrikli İtki Sistemleri için Mili-Newton Seviyesi İtki Ölçüm Sistemi Tasarımı

Uğur Kokal\* ve Murat Çelik†  
Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul

### ÖZET

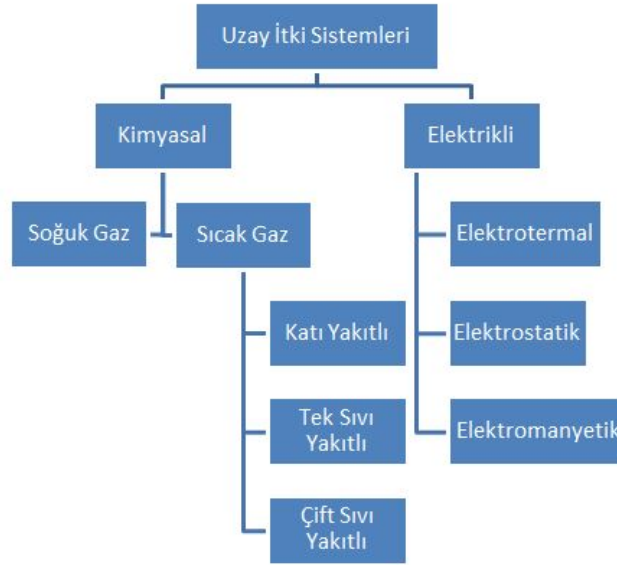
*Elektrikli itki sistemleri uzay araçlarının atmosfer dışındaki manevraları sırasında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu itki sistemlerinin yer testleri uzay koşullarının oluşturulduğu vakum tanklarında yapılmaktadır. Bu testlerin en önemli aşamalarından biri itki sistemlerinin ürettiği itki kuvvetinin tespitidir. Elektrikli itki sistemleri doğaları gereği mili Newton seviyelerinde düşük itki ürettiğinden ötürü itki ölçümleri düşük itki seviyelerini ölçebilecek sarkaç mekanizmalı aletler ile yapılmaktadır. Bu sayede itki ölçümü, itki sisteminin ağırlığı ve diğer dış etkenlerden arındırılmış olur. Dünyadaki çeşitli test merkezlerinde itki ölçüm sistemleri için farklı tasarımlar geliştirilmiştir. Bu çalışmada bu tasarımlar incelenmiş ve yapılacak olan ölçüm sisteminin ana hatları belirlenmiştir. Sonrasında Boğaziçi Üniversitesi Uzay Teknolojileri Laboratuvarı (BUSTLab) tarafından üretilmiş olan elektrikli itki sistemlerinin ve test ölçümlerinin yapılacağı vakum tankının özellikleri dikkate alınarak ayrıntılı tasarım yapılmıştır. Bu tasarım kapsamında seçilen sensörler ve motorlar özellikleriyle anlatılmıştır. Ölçüm sisteminin hassasiyetini korumak için ısı transferi analizi yapılmış ve gerekli ısı yalıtım sistemi tasarımı yapılmıştır. Sistemin inşasının bitmesinin ardından kalibrasyonun ve testlerin nasıl yapılacağı açıklanmıştır. Yapılmakta olan bu ölçüm sistemi bittiğinde BUSTLab bünyesindeki ve diğer laboratuvarlardaki elektrikli itki sistemlerinin itki ölçüm testleri yapılabilecektir.*

### GİRİŞ

Uzay itki sistemleri, uzay ortamında bulunan uyduların ve diğer uzay araçlarının istenilen görev özelliklerine uygun olarak yer ve konum değiştirmelerini sağlarlar. Uzay itki sistemleri kimyasal yakıtlı itki sistemleri ve elektrikli itki sistemleri olarak iki ana kategoriye ayrılabilir (Sekil 1). Kimyasal yakıtlı itki sistemleri hidrazin, azot, amonyum gibi yakıtların çeşitli hallerde depolanarak doğrudan soğuk gaz halinde veya yanma işlemi sonucu sıcak gaz halinde bir lüleden püskürtülmesi ile itki sağlarken elektrikli itki sistemleri, uzay aracının ana güç sisteminden aldığı enerjiyi termal ya da kinetik enerjisine döndüren sistemlerdir [Erichsen, 1997]. Kimyasal sistemlerin özgül impuls değerleri yaklaşık olarak 40-300 saniye civarındayken elektrikli itki sistemlerinde 10000 saniye mertebesinde özgül impuls değerlerine ulaşmak mümkündür. Yakıt tüketimi ve dolayısıyla itki

\*Uğur Kokal, Yüksek Lisans Öğrencisi, E-posta: ugur.kokal@boun.edu.tr

†Doç. Dr. Murat Çelik, Makine Müh. Böl., E-posta: murat.celik@boun.edu.tr



Şekil 1: Uzay İtki Sistemleri

İtki Sistemi	Güç [kW]	İtki [mN]	Vakum $I_{sp}$ [s]	Verimlilik, $\eta_t$
Hall	0.2-20	0.005-100	1500-3000	0.60
İon	0.5-25	0.005-500	2500-3400	0.65
Resistojet	0.5-1.5	5-500	300-350	0.80
Arcjet	0.005-26	5-5000	150-1000	0.35
MET	0.07-5	2-700	150-600	0.50

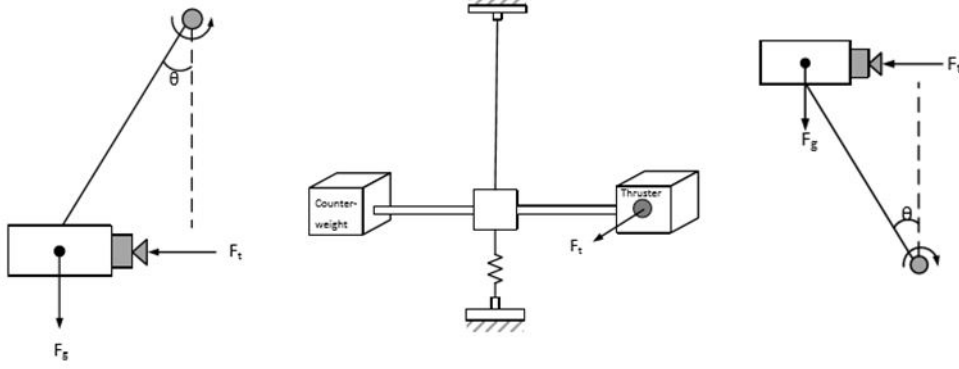
Tablo 1: Uzay İtki Sistemleri Karşılaştırma Tablosu [Clemens, 2008]

sistemi toplam ağırlığı kimyasal sistemlere oranla çok düşük seviyelere indirilebilmektedir [Turner, 2009].

Elektrikli itki sistemlerinin başlıca dezavantajı ulaşılabilir toplam itki ve itki yoğunluklarının (birim çıkış alanı için itki) düşük olmasıdır (Tablo 1). Bu nedenle, elektrikli itki sistemleri uzun çalışma süresi gerektirirler. Ancak yüksek yakıt kullanımı verimleri sayesinde uzun süreli uzay görevlerinde kimyasal itki sistemlerine göre önemli avantajlar sağlarlar. Bu durum elektrikli itki sistemlerinin, haberleşme uyduları gibi taşınabilir yakıt miktarının sistem işletim ömrünü belirlediği uzay araçları için cazip hale gelmesini sağlamaktadır [Jahn ve Choueiri, 2002].

Elektrikli itki sistemlerinin itki değerlerinin ve itki/kütle oranının çok düşük olması sebebiyle yüksek itki üreten kimyasal itki sistemlerinde kullanılan ölçüm sistemleri elektrikli itki sistemlerinde kullanılamamaktadır. Bu nedenle düşük itki değerlerini ölçebilecek sarkaç mekanizmasına dayalı ölçüm sistemleri geliştirilmiştir. Sarkaç mekanizması sayesinde itki sisteminin ağırlık kuvveti ve oluşturduğu itki kuvvetinin doğrultusu birbirinden ayrılmıştır. Bu sayede çok düşük itki kuvvetleri ağırlıktan bağımsız olarak ölçülebilmektedir [Pancotti, Haag, King ve Walker, 2013]. Dünyada genel olarak üç farklı tasarım konsepti kullanılmaktadır. Bunlar asılı sarkaç (hanging pendulum), ters sarkaç (inverted pendulum) ve burulum sarkacıdır (torsional pendulum) (Şekil 2).

Boğaziçi Üniversitesi Uzay Teknolojileri Laboratuvarı (BUSTLab) bünyesinde şu ana kadar Hall etkisi itki sistemi (Hall effect thruster), Radyofrekans iyon motoru (Radiofrequency ion thruster), ve Mikrodalga elektrotermal itki sistemi (Microwave electrothermal thruster) türlerinde çeşitli elektrikli itki sistemleri geliştirilmiş ve üretilmiştir. Bu sistemlerin testleri BUSTLab bünyesindeki



Şekil 2: İtki Ölçüm Sistemleri: a) Asılı Sarkaç, b) Burulum Sarkacı, c) Ters Sarkaç

vakum tankında yapılmaktadır. Üretimi yapılmış olan bu itki sistemlerinin itki değerlerini ölçmek için de bir itki ölçüm sistemi geliştirilmektedir.

### İTKİ ÖLÇÜM SİSTEMİNİN TASARIMI

Geliştirilecek itki ölçüm sistemi için test edilecek itki sistemlerinin ağırlıkları ve kullanılacak vakum tankının boyutları göz önünde bulundurularak ters sarkaç tasarımının inşa edilmesi kararlaştırılmıştır. Ters sarkaç mekanizması dünyada NASA Glenn Araştırma Laboratuvarı [Xu, Walker, 2009] ve Alman Uzay ve Havacılık Merkezi (DLR) [Neumann, Sinskes ve Harmann, 2013] gibi önemli uzay merkezlerinde de kullanılmaktadır. Ters sarkaç mekanizması sayesinde ölçüm sisteminin vakum tankındaki pompalardan kaynaklanan titreşimlerden en az düzeyde etkilenmesi sağlanmaktadır [Harmann ve Dartsch, 2015]. Ters sarkaç tasarımında itki sistemi sarkacın üst kısmında bulunmaktadır. İtki sisteminin ağırlığının ölçüm üzerindeki etkisini ortadan kaldırmak için sarkacın alt kısmına bir karşı ağırlık yerleştirilmektedir. Böylece ölçüm sistemine yaratılan itki kuvvetinden başka bir kuvvetin etki etmemesi sağlanmıştır. Ölçüm sırasında sarkacın hareketiyle birlikte itki doğrultusunun değişmesini engellemek için çift kollu sarkaç tasarımına yönelinmiştir [Tartler, Sanchez, 2010]. İtki sisteminin ve karşı ağırlığın yerleştirildiği platformlar paralel iki sarkaç kolu ile birleştirilmiştir (Şekil 3). Yatay platformlar ve sarkaç kolları 1 cm kalınlığında alüminyum plakadan lazer kesim ile üretilmiştir. Sarkaç kolları ile yatay platformlar esnek bağlantılar ile birleştirilmiştir. Aynı şekilde sarkaç kolları ile taşıyıcı dış iskeletin bağlantıları da esnek bağlantılar aracılığıyla yapılmıştır. Sarkaç sistemi, itki sistemi tarafından yaratılan bir itki kuvveti ile merkezdeki esnek bağlantılar etrafında hareket edebilmektedir. Bu hareket ile oluşan yer değiştirme bir uzaklık sensörü ile yüksek hassasiyette ölçülmektedir.

İtki ölçüm sisteminin uygulanacak itki kuvvetine vereceği tepki sarkaç denklemi ile hesaplanabilir:

$$\theta = \frac{FH}{k} \quad (1)$$

Bu denklemde  $\theta$  sarkacın eğim açısını,  $F$  itki kuvvetini,  $k$  esnek bağlantıların toplam sertliğini temsil etmektedir. BUSTLab bünyesindeki itki sistemlerinin ürettiği teorik itki değeri 25 mN değerinin altındadır. Buna göre kullanılacak esnek bağlantıların sertliği, uzaklık sensörünün ölçüm aralığı ve ölçüm sisteminin yüksekliği belirlenebilir. Aynı zamanda ölçüm sisteminin beklenen doğal frekansı da hesaplanmıştır:

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{J}} \quad (2)$$



Şekil 3: İtke Ölçüm Sisteminin 3 Boyutlu Çizimi

Bu denklemde,  $w_n$  ölçüm sisteminin doğal frekansını,  $k$  esnek bağlantıların toplam sertliğini,  $J$  ise toplam eylemsizlik momentini göstermektedir. Çeşitli ölçüler ve esnek bağlantılar için yapılan nümerik analizler sonucu itke ölçüm sisteminin doğal frekansının 1 Hz'den oldukça düşük olduğu ve yaklaşık 0.13 Hz olduğu görülmüştür. Vakum tankına bağlı olan pompaların 1 Hz frekansta çalıştığı göz önüne alındığında bu frekanstaki titreşimlerin ölçüm sistemi tarafından büyük ölçüde sönümleneceği görülmektedir.

### Esnek Bağlantılar

Ölçüm sisteminin sahip olduğu hareketli parçalar birbirlerine C-Flex esnek bağlantıları ile bağlanmıştır (Şekil 4). Bu bağlantı parçaları, vakum ortamında herhangi bir gaz salımı yapmadan, yağ ve benzeri kayganlaştırıcılar kullanılmadan çalışmaktadır. Aynı zamanda sürtünmesiz hareket edebilmektedirler. Ölçüm sisteminde bu bağlantı parçalarından dört adet üst platformda, dört adet alt platformda ve dört adet de sarkaç kollarının dış iskelete bağlanmasında olmak üzere toplamda 12 adet kullanılmıştır. Bu parçaların sertliği oldukça hassas bir şekilde bilinmektedir. İtke ölçüm sisteminde kullanılmak üzere seçilen esnek parçaların sertlik değerleri 0.09581 Nm/rad olarak belirlenmiştir.



Şekil 4: İtki Ölçüm Sisteminde Kullanılan Esnek Bağlantı Parçaları ve İç Yapısı



Şekil 5: LVDT Uzaklık Sensörü

### Uzaklık Sensörü

Ölçüm sisteminde kullanılacak olan uzaklık sensörü çeşidi LVDT (Linear Variable Differential Transformer) uzaklık sensörü olarak belirlenmiştir (Şekil 5). Bu sensör türü ile temassız ve vakum ortamında yüksek hassaslıkta ölçüm yapılabilmektedir. LVDT sensörler sıralı dizilmiş birincil ve ikincil elektromıknatis sarımları içermektedir. Uzaklığı ölçülecek yüzeye monte edilen bir ferromanyetik silindirik bir çekirdek bu sarımlar içerisinde hareket etmektedir. Birincil sarıma uygulanan akım bu ferromanyetik çekirdekler üzerinden ikincil sarımlarda bir akım indükleyerek ölçüm yapılmasını sağlamaktadır [Measurement Specialties Inc., 2013]. İtki ölçüm sisteminde kullanılan uzaklık sensörü MEAS DC-SE serisinden 2.54 mm menzile sahip bir LVDT uzaklık sensörüdür. Bu sensör 15 volt ile çalışarak 0-5 volt arasında çıkış sinyali vermektedir.

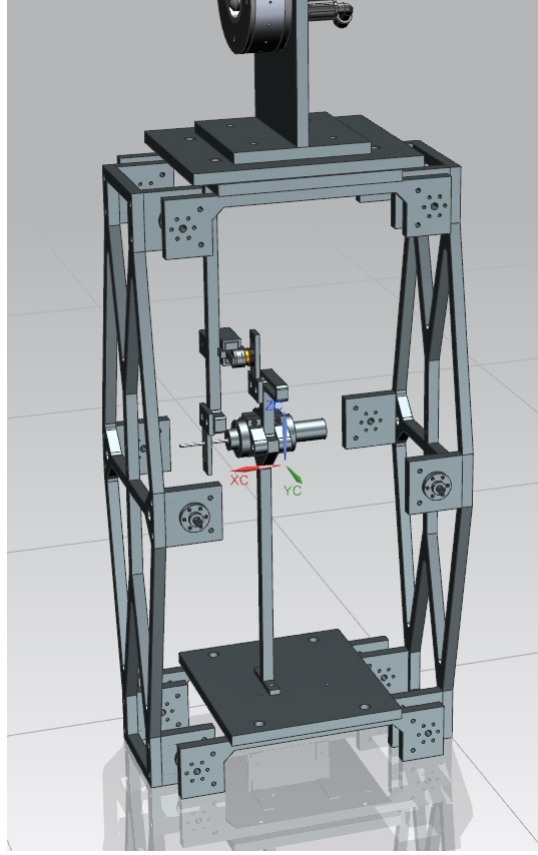
Uzaklık ölçümünün vakum tankındaki titreşimlerden etkilenmesini engellemek ve ölçüm hassasiyetini arttırmak için uzaklık ölçümü alt ve üst platformlar arasında yapılmaktadır. Bunun için LVDT sensörünün çekirdek parçası üst platformdan sarkan bir parçaya monte edilmiş, LVDT sensörünün kendisi ise alt platformun üzerine yerleştirilmiş bir kolonun üzerine monte edilmiştir. Böylece uzaklık ölçümü aralığı iki katına çıkarılarak hassasiyet artırılmıştır (Şekil 6).

### Yük Hücresi

İtki ölçüm sisteminde kullanılan yük hücresi, Transducer Techniques üretimi GSO-10 yük hücresidir (Şekil 7). Bu yük hücresi ile 100 mili Newtona kadar kuvvet ölçümü yapılabilmektedir. Yük hücresinden alınan sinyal LCA-RTC yük hücresi sinyal yükselticisi ile 0-5 volt arasına yükseltilmektedir.

### Ses Bobini

Ölçüm sistemi ses bobinleri ile kontrol edilmektedir. Ses bobinleri sürtünmesiz ve temassız kuvvet uygulanmasını olanaklı kılmaktadır. Bobine verilen akım ile bobinin içinde bir manyetik alan yaratılmakta ve diğer uçta bulunan mıknatısa ileri ya da geri yönde bir kuvvet uygulanabilmektedir [Black, Lopez, Morcos, 1993]. Ölçüm sisteminde Moticont tarafından üretilen LVCM-010-013-01 ses bobinleri kullanılmaktadır (Şekil 8). Bu bobinler ile 280 mN seviyesine kadar kuvvet



Şekil 6: İtki Ölçüm Sistemi Sarkaç Mekanizması

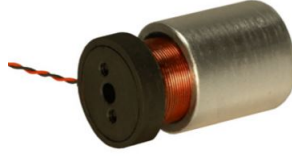


Şekil 7: Yük Hücresi

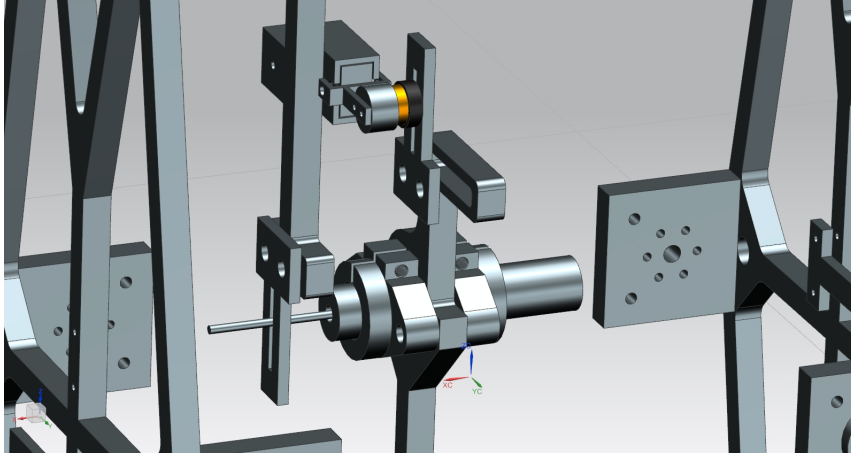
uygulanabilmektedir. Bobinlerin hareket menzili olan 6.4 mm ise uzaklık sensörünün ve sarkaç sisteminin maksimum hareket aralığının üzerindedir. Bobinlere verilen akımın yönü ile uygulanacak kuvvetin yönü değiştirilebilmektedir.

### Kalibrasyon Sistemi

İtki ölçüm sisteminin kalibrasyonu yük hücresi ve ses bobini kullanılarak yapılmaktadır. Ses bobininin mıknatıs içeren parçası ek bir parça aracılığıyla yük hücresine monte edilmiştir. Ses bobininin sarım içeren parçası sarkaç kollarından birine, yük hücresiyle ona bağlı olan ses bobininin mıknatıs kısmı ise diğer sarkaç koluna monte edilmiştir (Şekil 9). Bu sayede ses bobinine verilen akım ile sarkaca kuvvet uygulanabilmekte ve aynı zamanda uygulanan kuvvet yük hücresi ile ölçülebilmektedir. Kalibrasyon sırasında ses bobini üzerinden sarkaca itki sistemini taklit edecek bir kuvvet uygulanmakta ve bu sırada bu kuvvetin ölçümü yapılmaktadır. Sarkaç uygulanan bu kuvvet ile hareket ettiğinde oluşan bu hareket LVDT ile ölçülmektedir. Bu sayede itki ölçüm sisteminin uygulanacak olan itki kuvvetine vereceği tepki ölçülmektedir.



Şekil 8: Ses Bobini



Şekil 9: Sensör Grubu: LVDT, Ses Bobini ve Yük Hücresi

### Titreşim Sönümlenme Sistemi

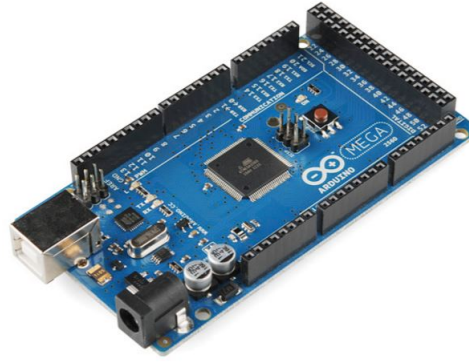
Sarkaç mekanizmasına uygulanacak kuvvetler, bağlantılardaki sürtünmesizlik nedeniyle uzun bir süre boyunca sönümlenmeyecektir. Aynı zamanda vakum tankındaki titreşimler gibi dış etkenlerden dolayı sarkaçta istenmeyen bir hareket gözlemlenebilir. Bunları engellemek için tasarıma bir girdap akımlı (eddy current) manyetik fren sistemi eklenmiştir. Bu sistem alt platformun altına eklenen bir bakır plaka ile bu plakanın iki yanında olacak şekilde dış iskelete monte edilmiş iki elektromıknatıstan oluşmaktadır. Bu elektromıknatıslara uygulanan akım ile elektromıknatıslar arasında bir manyetik alan oluşturulmaktadır. Bakır plaka sarkaç ile birlikte hareket ettiğinde değişen manyetik alan bir girdap akımı indükleyerek sarkaçın hareketini sönümleyecek bir kuvvet üretilmektedir [Cunningham, 1986]. Elektromıknatıslardaki akım kontrol edilerek sistemin tepki süresi değiştirilebilmektedir.

### Kontrol Sistemi

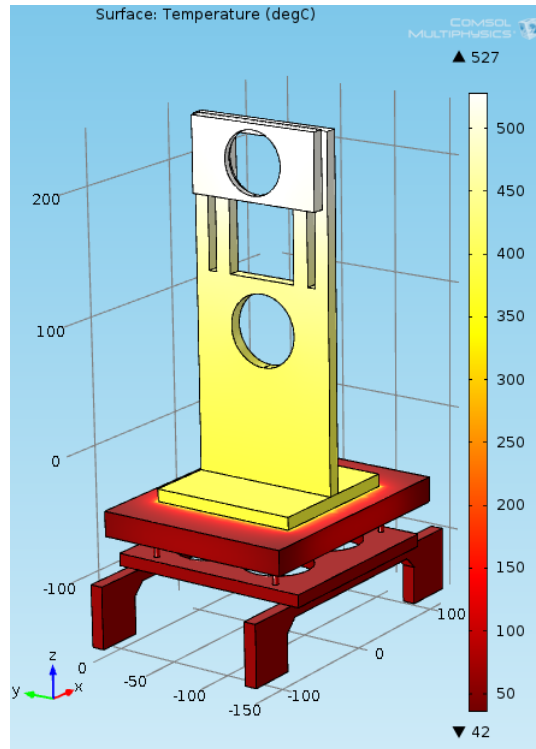
İtki ölçüm sistemi Arduino Mega denetleyici platformu tarafından kontrol edilmektedir (Şekil 10). Bütün sensörler Arduino Meganın giriş voltajı aralığı olan 0-5 volt aralığında çıkış verecek şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca ses bobinleri de Arduino'ya bağlanan bir Arduino motor shield kartı üzerinden kontrol edilmektedir. Sensör ölçümleri 10 bit hassaslıkla okunabilmektedir. Kontrol sistemi kalibrasyon komutu verildiğinde kalibrasyonu otomatik olarak tamamlayacak şekilde tasarlanmıştır.

## TEST PROSEDÜRÜ

İtki ölçüm sistemi iki ayrı modda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bunlar serbest pasif mod ve aktif moddur. Pasif modda ses bobini ile kontrol yapılmamaktadır. İtki sistemi ile bir itki kuvveti uygulandığında sarkaç mekanizması serbestçe hareket etmekte ve bu hareket LVDT tarafından ölçülmektedir. Sonrasında kalibrasyondan elde edilen veriler kullanılarak bu hareket ölçümü üzerinden itki değeri hesaplanmaktadır. Aktif modda ise sarkaç mekanizması ses bobini yardımı ile hareketsiz tutulmaya çalışılmaktadır. Kontrol sistemi giriş bilgisi olarak LVDT sensöründen gelen konum ölçümünü kullanmaktadır. Sarkaç hareketsiz durumdayken yük hücrelerinden ölçülen kuvvet



Şekil 10: Arduino Mega Denetleyici



Şekil 11: İtki Ölçüm Sistemi Üst Platform Isı Transferi Analizi

itki sisteminin uyguladığı kuvveti vermektedir. Bu iki ayrı mod ayrı ayrı uygulanmakta ve ölçüm sonuçları karşılaştırılarak hataların azaltılması sağlanmaktadır.

## TERMAL ANALİZ

İtki ölçüm sistemi yapısı gereği ısıl genleşmelerden etkilenebilmektedir. Ayrıca hassas sensörler de sıcaklık artışından olumsuz etkilenebilmektedir. Bu nedenle itki ölçüm sistemi üst platforma yerleştirilen itki sisteminden ve vakum tankındaki plazmadan yalıtılmıştır. İtki sistemleri bir teflon plaka üzerine yerleştirilmiş ve bu teflon plaka yalıtkan vidalar aracılığıyla sarkacın üst platformu üzerinde yükseltilmiştir. Böylece de itki sisteminde oluşan ısının minimum düzeyde ölçüm sistemine iletilmesi sağlanmıştır (Şekil 11).

Ayrıca vakum tankında bulunan plazmanın ölçüm sistemindeki sensörlere zarar vermesini engellemek için itki ölçüm sistemi bir koruyucu zırh ile kaplanmış ve bu koruyucu zırhın üzerine soğutma kanalları yerleştirilmiştir. Bu kanallardan soğuk su geçirilerek itki ölçüm sistemine



aktarılan ısı emilmekte ve sıcaklık artışı engellenmektedir.

## SONUÇ

Bu makalede elektrikli itki sisteminin itki ölçümlerini yapacak bir itki ölçüm sisteminin tasarımı anlatılmıştır. Çeşitli ölçüm sistemi tasarımları incelenmiş ve karşı ağırlıklı ters sarkaç tasarımına yönelinmiştir. İtki ölçümleri yapılacak olan itki sistemlerinin üreteceği maksimum itki 25 mN olarak alınıp tasarımlar bu doğrultuda yapılmıştır. Kullanılan uzaklık sensörü alt ve üst platformlar arasına yerleştirilerek ölçüm hassasiyeti artırılmış ayrıca sistemin vakum tankındaki titreşimlerden minimum düzeyde etkilenmesi sağlanmıştır. Kullanılan sensörler ve eyleyiciler ölçülecek itki düzeylerine göre birbirleriyle uyumlu olacak şekilde seçilmiş ve maksimum hassaslığı sağlayacak şekilde yerleştirilmiştir. Sistemin kontrolü Arduino Mega denetleyici üzerinden yapılmaktadır. Bu denetleyicinin yazılımı ayrıca yazılmakta olup kalibrasyonu ve ölçümleri otomatik olarak yapması sağlanacaktır. Ölçüm sistemi, kalibre edildikten sonra aktif ve pasif modlarda itki ölçümü yapacaktır.

Yapılan ısı transferi analizleri sonucunda ölçüm sisteminin itki sistemlerinden ve vakum tankındaki plazmadan oldukça az etkileneceği görülmüştür. Ayrıca sıcaklık sensörleriyle yapılacak ölçümler sayesinde itki ölçümü sıcaklık değişimlerine karşı düzeltilebilecektir. Yapılan teorik analizler deneysel ölçümlerle de karşılaştırılacaktır. İtki ölçüm sisteminin yapım sürecinin tamamlanmasıyla birlikte itki ölçüm testleri başlayacaktır. Elde edilen sonuçlara göre ölçüm sistemi geliştirilmeye devam edecektir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı 214M572 nolu 1005 projesi kapsamında destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) ve ayrıca BAP-11482 nolu proje kapsamında destekleyen Boğaziçi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne (BAP) teşekkür ederiz.

## Kaynaklar

- Black, B., Lopez, M., ve Morcos, A., 1993. *Basics of Voice Coil Actuators*, BEI Motion Systems Company, San Marcos, California, ABD
- Clemens, D. E., 2008. *Performance Evaluation of the Microwave Electrothermal Thruster Using Nitrogen, Simulated Hydrazine and Ammonia*, Pennsylvania State University, Pensilvanya, ABD, Doktora Tezi
- Cunningham, R. E., 1986. *Passive Eddy-Current Damping as a Means of Vibration Control in Cryogenic Turbomachinery*, NASA Technical Paper 2562, Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, ABD
- Erichsen, P., 1997. *Performance Evaluation of Spacecraft Propulsion Systems in Relation to Mission Impulse Requirements*, Proceedings of the Second European Spacecraft Propulsion Conference, Noordwijk, Hollanda
- Harmann, H.-P. ve Dartsch, 2015. *Low Drift Thrust Balance with High Resolution*, International Electric Propulsion Conference, Hyogo-Kobe, Japonya, Temmuz, IEPC-2015-257
- Jahn, R. G. ve E. Y. Choueiri, 2002. *Electric Propulsion*, Encyclopedia of Physical Science and Technology, Cilt. 142, Sayı. 3589, s. 125-141
- Measurement Specialties Inc. *The LVDT: construction and principles of operation*
- Neumann, A., Sinskes, J., ve Harmann, H.-P., 2013. *The 250mN Thrust Balance for the DLR Goettingen EP Test Facility*, 33rd International Electric Propulsion Conference, Washington DC, ABD, Ekim, IEPC-2013-211
- Pancotti, A., Haag, T., King, S., and Walker, M., 2013. *Recommended Practices in Thrust Measurements*, 33rd International Electric Propulsion Conference, Washington DC, ABD, 2013, IEPC-2013-440
- Tartler, B., ve Sanchez M. 2010. *Construction and Performance of an Inverted Pendulum Thrust Balance*, MIT, Massachusetts, ABD, Master Tezi
- Turner, M. J. L., 2009. *Rocket and Spacecraft Propulsion*, Springer
- Xu, K. G. ve Walker, M. L. R., 2009. *High-Power, Null-Type, Inverted Pendulum Thrust Stand*, Review of Scientific Instruments, Cilt. 80, Sayı. 5