

QB50 PROJESİ KAPSAMINDA BEEAGLESAT KÜP UYDUSUNUN GELİŞTİRİLMESİ

A.Rüstem ASLAN¹, Ertan ÜMİT²
Murat ŞİMŞEK³, M.Şevket ULUDAĞ⁴,
M.Deniz AKSULU⁵, Ahmet SOFYALI⁶
İTÜ, İstanbul

M.Erdem BAŞ⁸, İ. Eray AKYOL⁹
Ertek Uzay Sis. Ltd., İstanbul

Murat SÜER⁷
Gumush Uzay Ltd., İstanbul

Emrah KALEMCI¹⁰
Sabancı Üniv., İstanbul

Mustafa İLARSLAN¹¹
Hava Harp Okulu, İstanbul

ÖZET

BeEagleSat uydusu ülkemizde üniversiteler, büyük sanayi ve KOBİ işbirliğinde, Avrupa Birliği QB50 projesi kapsamında geliştirilmekte olan iki birim bir küp uydudur. QB50 projesi ile ilk defa küp uydular birincil yük olarak uzaya erişim olanağı bulacaktır. Ayrıca, çok uluslu ve çok kurumlu bir yapılanma içerisinde uzay sistem geliştirme tecrübesi bulunan birçok büyük uzay kurumunun deneyiminin de kullanarak küp uydular kümesi geliştirme birikimi oluşturulmaktadır. Uyduların ana amacı henüz yeterince incelenmemiş termosfer tabakasında proje kapsamında geliştirilmekte olan duygalar ile ortam ölçümleri yapılması, yapılan ölçümlerin dünya çapındaki yer istasyonları tarafından toplanması ve bilginin paylaşılmasıdır. Ölçülen veriler ile daha doğru termosfer modellemesi yapılması öngörülmektedir. BeEagleSat uydusu ortakları da QB50 projesinin uluslararası ortamı içerisinde dünya deneyimlerini kendi tecrübeleri ile birleştirmektedir. Uydunun yönelim kontrol ve duyurga sistemleri proje kapsamında QB50 konsorsiyumu tarafından sağlanmakta, ikinci ana yük ve diğer alt sistemler ise proje ekibi tarafından geliştirilmektedir.

¹ Prof. Dr. Alim Rüstem Aslan, Uzay Müh. Böl., E-posta: aslanr@itu.edu.tr

² M. Ertan Ümit, Uzay Müh. Böl., E-posta: m.e.umat@gmail.com

³ Müh. Dr. Murat Şimşek, Uzay Müh. Böl., E-posta: simsekmu@itu.edu.tr

⁴ M. Şevket Uludağ, Uzay Müh. Böl., E-posta: uludagm@itu.edu.tr

⁵ M. Deniz Aksulu, Elektronik Müh. Böl., E-posta: aksulumdeniz@gmail.com

⁶ Araştırma görevlisi Ahmet Sofyalı, Uzay Müh. Böl., E-posta: sofyair@itu.edu.tr

⁷ Murat Süer, E-posta: murat@simmeca.com

⁸ M. Erdem Baş, E-posta: merdembas@gmail.com

⁹ İ. Eray Akyol, E-posta: isaerayakyol@gmail.com

¹⁰ Doç. Dr. Emrah Kalemci, E-posta: ekalemci@sabanciuniv.edu

¹¹ Hv. Müh. Alb. Mustafa İlarıslan, E-posta: m.ilarıslan@hho.edu.tr

GİRİŞ

Son yıllarda küp uydulara olan ilgi üstel bir biçimde artmıştır. 2013 yılı içerisinde akademik ve araştırma kurumları ve yetkin uzay ajansları tarafından geliştirilenler de dahil olmak üzere onlarca küp uydu uzaya gönderilmiştir. Önceleri sadece uzay sistemleri alanında uygulamalı eğitimi desteklemek amacı ile geliştirilmiş olan bu sistemler artık büyük uydularının işlevlerini destekleyici roller üstlenme seviyesine gelmiştir. Bu uyduların en büyük sorunlarından bir tanesi uzaya erişimdir. Genellikle bir ana yük ile birlikte istenen değil, ana yükün gittiği yörüngeye yerleşmek durumunda kalınmaktadır. Bu sorunları aşmak üzere Avrupa Yedinci Çerçeve programı FP7 kapsamında pilot olarak bir küp uydu sistemlerini uzaya ana yük olarak gönderme projesi tanımlanmış ve von Karman Enstitüsü liderliğinde çok uluslu ve kurumlu bir konsorsiyum tarafından proje alınmıştır [QB50, 2014].

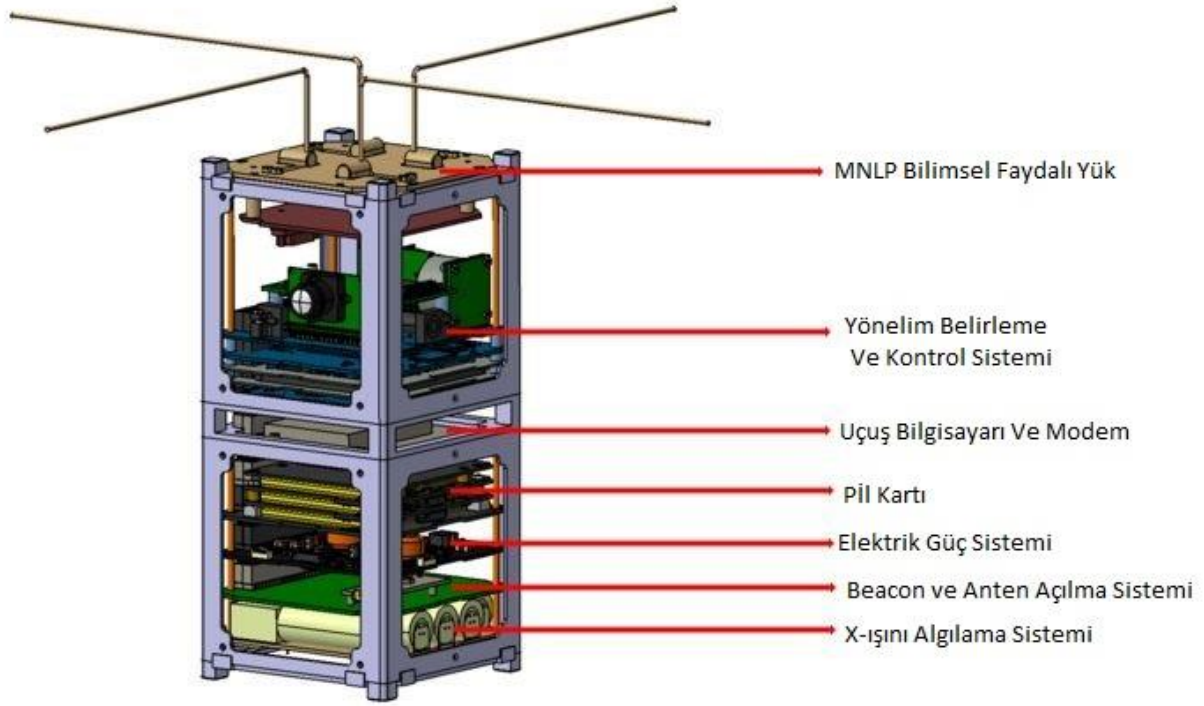
Proje kapsamında ana görev küp uydu kümeleri kullanarak henüz yeterince incelenmemiş aşağı termosfer tabakasında proje kapsamında geliştirilmekte olan sensörler ile ortam ölçümleri yapılması, yapılan ölçümlerin dünya çapındaki yer istasyonları tarafından toplanması ve bilginin paylaşılmasıdır. Ölçülen veriler ile daha doğru termosfer modellemesi yapılması öngörülmektedir. QB50 uydu sistemi 50 adet küp uydudan oluşacaktır. Bunların 40 adedinin 2 birim ve 10 adedinin de 3 birim küp uydusu olması planlanmıştır. Bu 50 uydu proje ana ortakları dışında QB50 yönetimi tarafından seçilen takımlar tarafından geliştirilecektir. Bu geliştirici takımlara, fırlatmaya ek olarak sistem isterleri bilgisi, proje deneyimi, duyurga sistemi ve yönelim belirleme kontrol sistemi sağlanabilecektir.

İTÜ ve HHO/HUTEN bir ekip olarak Sabancı üniversitesi ile de birlikte gerekli uydu geliştirici seçim sürecini başarı ile geçmiş, BeEagleSat adını verdikleri uydularını büyük endüstri desteği altında geliştirmektedir. Proje CDR aşamasını tamamlamıştır. QB50 ana üyeleri tarafından geliştirilen ortam ölçüm duyurgaları, QB50 ADCS, uydu yapıları ve uydu fırlatma kutuları Haziran 2014 yılında gerçekleştirilen öncü fırlatma sonucu ilk testleri başarı ile geçmiştir[Rotteveel, 2014].

BeEagleSat uydusunun temel olarak iki görevi bulunmaktadır. Bunlardan ilki QB50 projesi kapsamında sağlanan bilimsel faydalı yük Multi Needle Langmuir Probe (MNLPP) alt sistemi kullanılarak aşağı termosfer tabakasında 380 km ile 200km arasında ortam verisi toplanması ve bu verilerin proje kapsamındaki yer istasyonlarına iletilmesidir. İkinci görev ise Sabancı Üniversite ve İstanbul Teknik Üniversitesi'nin birlikte geliştirmekte olduğu X-ışını algılayıcısı alt sistemidir. Bu alt sisteminin amacı, X-ışını dalga boyunda ışık yayan gök cisimlerinin incelenmesi ve bu tarz sistemlere uzay tecrübesinin kazandırılmasıdır.

QB50 projesi ana hedefleri uzaya küp uyduların erişiminin kolaylaştırılması, üst düzey bilimsel araştırma, uzay mühendisliği eğitimi ve yörüngede görev başarımıdır. BeEagleSat uydusu ortakları da QB50 projesinin uluslararası ortamı içerisinde dünya deneyimlerini kendi tecrübeleri ile birleştirmektedir. Uydunun yönelim kontrol ve duyurga sistemleri proje kapsamında QB50 konsorsiyomu tarafından sağlanmakta, ikinci ana yük ve diğer alt sistemler ise proje ekibi tarafından geliştirilmektedir.

Uyduların 2016 yılı ilk yarısında Brezilya'daki fırlatma merkezinden Cyclon 4 roketi ile fırlatılması planlanmıştır [QB50, 2014].



Şekil 1: BeEagleSat Uydusu ve alt sistemleri

UYDUNUN ALT SİSTEMLERİ

Uydu temel olarak, haberleşme sistemi, uçuş bilgisayar sistemi, elektrik güç sistemi, yönelim belirleme-kontrol sistemi ve ana ve ikincil paralı yük olmak üzere 6 adet alt sistemden oluşmaktadır, Şekil 1. Uydu yapısı, haberleşme birimleri, uçuş bilgisayar ve yazılımları ile X-ışını algılayıcısı proje ekibi tarafından geliştirilmekte ve üretilmektedir. Güç sistemi hazır olarak alınacak, tasarım kapsamında uyduya entegre edilecektir. Proje ekibi QB50 yönetimi tarafından QB50-ADCS sistemi sağlanacak yetkin ekiplerden birisi olarak seçilmiştir.

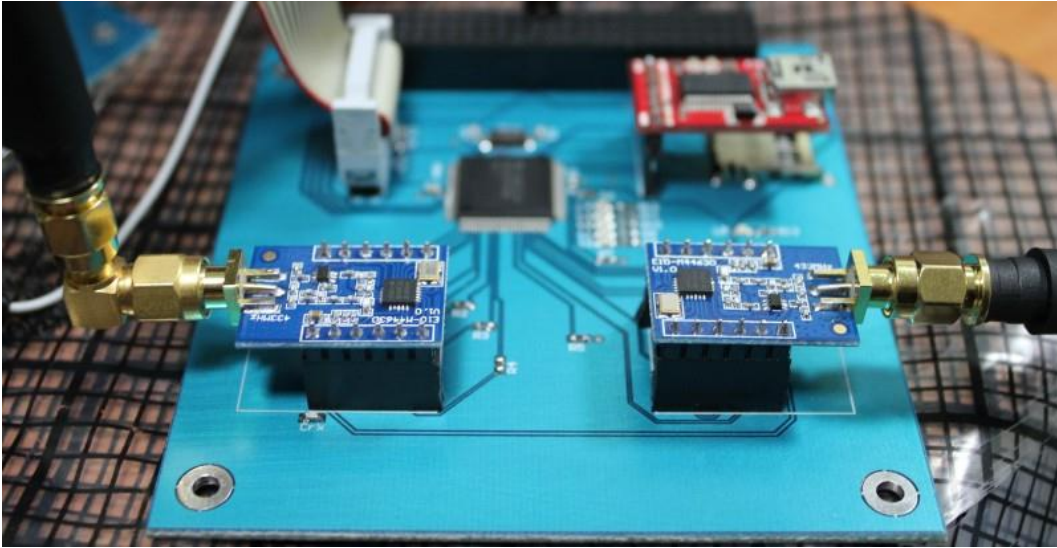
Haberleşme Sistemi

Uydu alt sistemlerinin içinde en önemli sistemlerden biri haberleşme sistemidir. Yörüngeye yerleştirilen uydunun sağlık durumu, görevi sonucu toplanan bilimsel veri ve telekomut gibi önemli bilgiler ve komutlar bu sistem sayesinde iletilir. Uyduya ulaşılamadığı takdirde uydunun görevini başarıyla gerçekleştirmesi söz konusu değildir.

Haberleşme sistemi genel olarak üç birimden oluşmaktadır. Bunlar; modem, beacon modem ve antenlerdir. Haberleşme sisteminin görevi basitçe, yer istasyonuna veri yollamak ve yer istasyonundan gelen komutları uçuş bilgisayarına iletmektir.

Modem: BeEaglesat uydusunun haberleşme sisteminin modem birimi, Ertek Uzay Sistemleri Ltd. tarafından, USTTL yardımlarıyla geliştirilmektedir. Güç, yer ve kütle tasarrufu sağlayabilmek amacıyla modem ve uçuş bilgisayar aynı devre kartında yer almaktadır.

Veri alışverişi Silicon Labs firmasının SI4463 RF çipleriyle sağlanmaktadır. Bu çipler seri haberleşme (SPI) kanalları kullanılarak uçuş bilgisayar mikrodenetleyicisi ile kontrol edilmektedir. Yazılımsal olarak kontrol edilebilen çiplerle frekans, modülasyon, band genişliği, veri paket yapısı, modem çıkış gücü, veri hızı gibi önemli parametreler ayarlanarak küp uydularda kullanıma uygun düşük güç tüketimli bir modem üretilebilmektedir. Aynı zamanda çiplerde dahili yer alan sıcaklık ölçümü özelliği sayesinde kullanışlı bir modem üretilmiştir. Böylece sistem sıcaklığı denetim altına alınabilmektedir [SILABS, 2014]. Şekil 2'de bilgisayar ve modem sistemi görülmektedir.



Şekil 2: Uçuş Bilgisayarı ve Modem Sistemi Deneme Kartı

QB50 projesi kapsamında diğer tüm gruplarla ortak çalışabilmek adına modemde kullanılan veri paketleme protokolü, amatör radyocular tarafından sıklıkla kullanılan AX.25 protokolüdür [Singarayar, 2013]. Hem veri almak hem de veri yollamak için bu paket protokolü kullanılmaktadır.

Modem birimi alıcı ve verici olarak iki bölümden oluşmaktadır. Alıcı VHF (145MHz) bandında, verici UHF (430 MHz) bandında çalışmaktadır. İki bölüm için ayrı RF çipler kullanılmaktadır. Böylelikle modem aynı anda hem veri alışı hem de veri iletimi için kullanılabilir.

Verici bölümünde, bilgisayardan gelen dijital veri belirlenen ayarlarla (frekans, sinyal gücü, modülasyon vb.) verici çipinde RF sinyaline dönüştürülür fakat bu sinyalin çıkış gücü (en fazla +20dBm) link bütçesini karşılayamayacağından kuvvetlendirilmesi gerekmektedir. Verici tarafında çıkış sinyal gücünü 1W'a (+30dBm) çıkaran RF kuvvetlendirici kullanılmıştır. Verici bölümünde veri hızı 9.6kbps olarak belirlenmiştir [SILABS, 2014].

Alıcı bölümünde, uyduya gönderilen RF sinyaller çip sayesinde dijital veriye çevirilerek uçuş bilgisayarına iletilmektedir. Alış hassasiyeti -126dBm olduğundan alıcı tarafta RF kuvvetlendiriciye ihtiyaç olmadan link bütçesi sağlanmaktadır [SILABS, 2014]. Alıcı bölümünde veri hızı 1.2kbps olarak belirlenmiştir.

Beacon Modem: Beacon modemnin amacı uydunun adı, uydunun seri numarası, faydalı yük bilgisi gibi uydu hakkında temel bilgilerin yer istasyonuna iletilmesidir. Beacon modem mors kodu ile veri yollayarak uydunun takibini kolaylaştırmaktadır. Aynı zamanda periyodik olarak uydu sağlık bilgisini ve belirli görev verisini yollayarak, verilerin modemden alınamadığı durumlarda da gerekli bilgiye ulaşılabilmesi sağlanmaktadır.

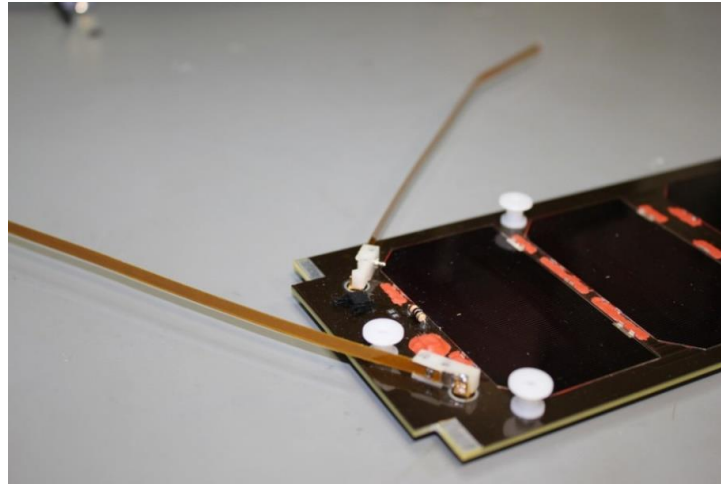
Beacon modem, I2C veri hattından uçuş bilgisayarına bağlanarak her 30 saniyede bir durum bilgisini yayın yapmaktadır [Singarayar, 2013]. Bu süreyi sağlayabilmek için FSK modülasyonu kullanılarak 1.2kbps veri hızında veri iletilecektir. Aynı zamanda mors kodu kullanılarak uydu adı gibi tanımlayıcı bilgilerin yayını yapılacaktır.

BeEagleSat küp uydusunda beacon modem olarak kullanılmak üzere Troy Firmasının geliştirdiği ürünün kullanılması değerlendirilmektedir. Şekil 3'te TROY modem görülmektedir.



Şekil 3: Troy Beacon

Antenler ve Açılma Sistemi: Uydunun haberleşmesi sisteminde monopol antenler kullanılacaktır. Monopol antenler, küp uydularda kullanım kolaylığı sunduğundan çokça kullanılmaktadırlar. Anten boylarının, VHF (145 MHz) bandında $\lambda/8$, yaklaşık (50cm), UHF (433 MHz) bandında $\lambda/4$, yaklaşık (20cm), olarak kullanılması kararlaştırılmıştır. Yapılan RF analizler sonucunda ve daha önce TURKSAT 3USAT küp uydusunda kullanılan antenlerin ölçümlerinde, bu uzunluklardaki antenlerin gerekli sinyal iletim oranını sağladığı ve kazançlarının yaklaşık 2dB olduğu görülmüştür [İTÜ RF Lab, 2011].

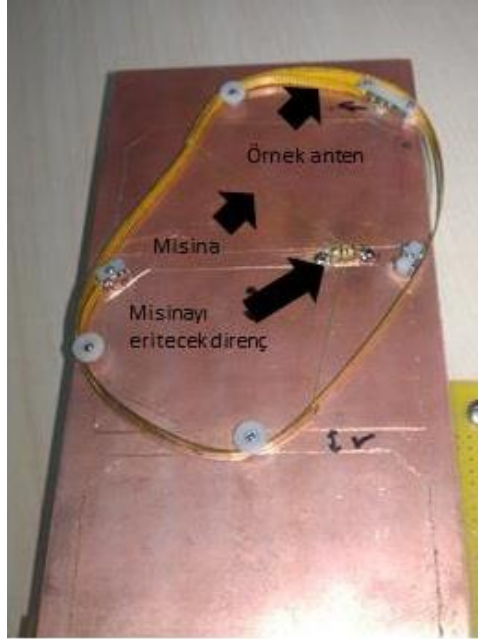


Şekil 4: Uçuş Modeli Üzerindeki Antenler ve Açma Mekanizması

Basit bir mekanik sistemle açılan antenler her yöne sinyal yaydığı için uydu üzerinde karmaşık yönlendirme sistemlerine ihtiyaç duymazlar. Sınırlı elektrik gücü nedeniyle en basit çözüm kullanılması planlanmaktadır.

Küp uydu, fırlatıcı (Deployer) adı verilen bir yapıya konarak fırlatma roketine yerleştirilmektedir. Fırlatıcının amacı, küp uydunun roketten güvenli bir şekilde ayrılmasını sağlamaktır. Fırlatıcının fiziksel yapısı sebebiyle antenleri açık bir şekilde yerleştirmek mümkün değildir. Bu nedenle antenleri, fırlatma öncesi zarar görmeyecek şekilde küp uyduya uygun bir şekilde sararak korumak gerekmektedir.

Kullanılan antenler için açılma mekanizması basit bir sarma sisteminden oluşur (Şekil 5). Uydu üzerinde, daire şeklinde sarılan monopol antenler misina ile bağlanarak sabitlenir.



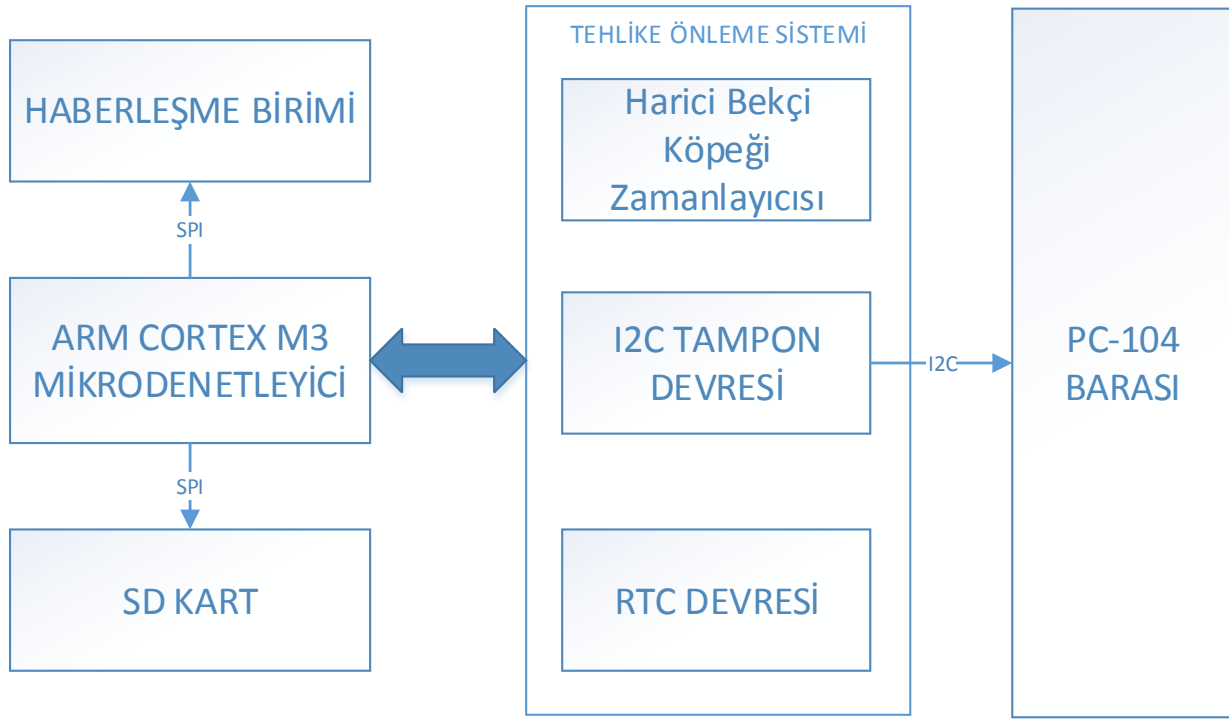
Şekil 5: Uydu Açma Mekanizması Deneme Paneli

Uydunun yörüngeye oturmasından belirli bir süre sonra, açılma sistemi için geliştirilen devrede yer alan anahtarlar gelen sinyal ile açılarak açılma mekanizmasındaki dirençlere gerilim uygulanmasını sağlar. Bu gerilim sonucu dirençten akım akar ve bu akım nedeniyle ısınan direnç misinayı koparır. Böylece antenler sorunsuz bir şekilde açılabilir. Açılma sistemini uydu bilgisayarı kontrol eder. Açılma sisteminde hata olsa bile misinalar zamanla eskiyerek kendiliğinden kopacaktır.

Antenin sorunsuz açılabilmesi için, antenin yapısal olarak belli bir sertlikte olması gerekmektedir. Bu sertlik berilyum elementinin bakır ile alaşımı sonucu elde edilebilmektedir. Genellikle, bu tür uygulamalarda %0.05 ile %0.15 arasındaki oranlarla bakır-berilyum alaşımı kullanılır. Berilyum malzemeye sertlik katarken aynı zamanda iletkenlik özelliğini belirleyen iletkenlik katsayısına(ϵ) olumsuz yönde etkilemektedir. Diğer birçok küp uydu uygulamalarında da anten malzemesi olarak bakır-berilyum alaşımı tercih edilmiştir [İTÜ RF Lab ,2011].

Uçuş Bilgisayarı Sistemi

BeEaglesat uydusunun uçuş bilgisayarı sistemi Ertek Uzay Sistemleri Ltd. tarafından geliştirilmektedir. Modem ve uçuş bilgisayarı tüm alt sistemlerin ve RF çiplerinin kontrolü amacıyla aynı mikrodenetleyici kullanılmaktadır. Bu sistemin amacı diğer tüm alt sistemleri kontrol etmek, veri toplayıp düzenlemek ve modem vasıtasıyla veri iletimini sağlamaktır. Uçuş bilgisayarı sistemi mikrodenetleyici, veri depolama ve tehlike önleme birimleri olmak üzere 3 kısımdan oluşmaktadır [Umit, 2012]. Sisteme ait blok şema şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6: Uçuş Bilgisayarı Sistemi Blok Şeması

Mikrodenetleyici Birimi: Uçuş bilgisayarının temel elemanı olan bu birim ARM Cortex M3 tabanlı mikrodenetleyici ve onun çevresel birimlerinden oluşmaktadır. Yüksek veri işleme hızı, düşük güç tüketimi ve çok sayıda giriş/çıkış birimi özellikleri nedeniyle uçuş bilgisayarı ARM tabanlı mikrodenetleyiciler kullanılarak geliştirilmiştir [ARM, 2014]. Mikrodenetleyici, uçuş bilgisayarının yer aldığı devre kartında bulunan veri depolama birimine SPI haberleşme protokolüyle bağlanmıştır. Bu sayede görev boyunca bütün gerekli durum bilgileri ve faydalı yüklerden gelecek veriler mikrodenetleyici tarafında depo birimine iletilecektir. Mikrodenetleyici uydu veri barasına I2C, UART ve SPI protokolleri ile bağlıdır. Bu sayede uyduda yer alan bütün diğer birimlerle iletişim sağlanmakta ve gerekli veri alışverişi gerçekleştirilmektedir. Bunlara ilave olarak mikrodenetleyici, devre kartında bulunan RTC (Real Time Clock) entegresi sayesinde gerçek zamanlı olarak çalışabilmektedir. Mikrodenetleyiciye gömülen kodun akışında herhangi bir nedenle oluşabilecek bir aksama olduğunda, görevi riske atmamak ve bir an önce bu hatadan kurtulmak için harici tehlike önleme birimi mikrodenetleyiciye donanımsal olarak bağlanmıştır.

Veri Depolama Birimi: Uçuş bilgisayarı sistemi veri depolama birimi olarak aynı devre kartı üzerinde bulunan ve 2 GB hafızaya sahip mikro SD kartı kullanmaktadır. Mikrodenetleyici ile SPI protokolü üzerinden haberleşen SD kartta görev boyunca gerekli olan durum güncellemeleri ve faydalı yüklerden gelecek veriler depolanacaktır. Depolanan veriler uygun bir şekilde işlenip düzenlendikten sonra yer istasyonuna gönderilmek üzere haberleşme birimine iletilecektir. Böylece QB50 sistem gereklilikleri karşılanmış olmaktadır [Singarayar, 2013].

Tehlike Önleme Birimi: Yazılımda görev sırasında herhangi bir nedenden ötürü meydana gelebilecek aksaklıkların (sonsuz döngüler, kesme problemleri vb.) uydunun görevini tehlikeye atmaması için harici bir bekçi köpeği zamanlayıcısı (Watchdog timer) entegresi kullanılmaktadır. Bu sayede herhangi bir hata durumunda mikrodenetleyici donanımsal olarak resetlenecek, hata raporlanacak ve kodun düzenli akışı tekrar sağlanacaktır. Mikrodenetleyici içinde de bekçi köpeği zamanlayıcısı bulunmasına rağmen harici bir entegre kullanılarak güvenilirlik artırılmış ve daha az güvenilir olan dahili zamanlayıcı devre dışı bırakılmıştır.

Görev bilgisayarı birimi, uydu içi haberleşmesi için en kritik protokol olan I2C haberleşmesinin bir nedenden ötürü çökme olasılığını ortadan kaldırmak için harici I2C tampon devreleri kullanmaktadır. I2C barasında meydana gelebilecek bir sıkıntı bütün uydu görevini tehlikeye

atacağı için harici tampon devrelerinin devre kartı üzerinde bulunması güvenilirliği sağlamak açısından zorunludur.

Son olarak uydu görevlerinin gerçek zamanlı yapılabilmesi ve uydunun kullandığı takvimin ayarlanmasındaki sıkıntıları (reset sonrası güncelleme vb.) giderebilmek için harici bir RTC (Real Time Clock) entegresi kullanılmıştır. Fırlatma öncesinde kurulacak RTC, daha sonra görev esnasında meydana gelebilecek senkronizasyon problemlerinin de önüne geçmektedir.

Uçuş Bilgisayarı Yazılımı: Uçuş bilgisayar yazılımının temel görevi tüm uydunun birimleriyle ilgili olan verileri toplamak, depolamak ve yer istasyonuna iletmek için işlemektir. PC-104 barası ile birbirlerine bağlanan tüm alt sistemler I2C protokolü üzerinden görev bilgisayarına bağlıdır. Yazılım, bu bağlantıyı kullanarak uydu alt sistemleri haberleşerek gerekli verileri toplamaktadır. Görev tanımında temel olarak bir yörünge boyunca toplanan durum verileri, bilimsel birimlerden gelecek veriler ve faydalı yük verileri olmak üzere 3 adet veri tipi vardır.

Bir yörünge boyunca toplanan durum verisinde aşağıda yer alan kritik verilerden oluşmaktadır [Singarayar, 2013].

- Gerçek zaman verisi
- Görev bilgisayarının hangi modda çalıştığı
- Pil gerilimi
- Pil akımı
- 3.3V hattı akımı
- 5V hattı akımı
- Modem sıcaklığı
- Güç sistemi sıcaklığı
- Pil sıcaklığı

Bilimsel birimlerden gelecek verileri MNLP duyurga çıktıları oluşturmaktadır. Faydalı yük verileri ise X- ışını algılayıcısından gelecek olan verilerdir.

Elektrik Güç Sistemi

Elektrik güç sisteminin amacı uydunun ihtiyacı olan enerjiyi gerekli gerilim seviyelerine çevirerek diğer sistemlere aktarmaktır. Elektrik güç sistemi kendi içerisinde üçe ayrılmaktadır. Birincil enerji kaynağı olan güneş panelleri, ikincil enerji kaynağı olan piller ve elektriksel gücün kontrol ve dağıtımından sorumlu mikrodenetleyici tabanlı işlemci birimi [Aslan, 2013].

Güneş Panelleri: Güneş Panelleri uydunun birincil enerji kaynaklarıdır. Kullanılan güneş hücrelerinin teknolojisine bağlı olarak elektrik enerjisi üretim verimleri ve görev ömürleri değişmektedir. BeEagleSat küp uydusunda bir çok küp uyduda kullanılan ve daha önce TÜRSAT-3USAT küp uydusunda da kullanılan %30 verimli, GaAs üç jonksiyonlu güneş hücreleri panellerde kullanılacaktır [Aslan, 2013].

Güneş panellerinde bulunan güneş hücrelerinin, uydunun uygun olan tüm yüzeylerine konularak üretilen enerjinin en yüksek seviyede tutulması hedeflenmektedir. Uydunun +z ve de -z yüzeylerinde bilimsel yükler olmasından dolayı, bu yüzeylere güneş paneli koyulamayacaktır. Diğer yüzeylerin tamamına da, uydu yönelim belirleme ve kontrol sisteminin kameralarının yan yüzeylerden dışarıya doğru konumlandırılması ve bu sistemin manyetometresinin uydu yüzeyinden dışarı doğru uzanması nedenleriyle, tüm yüzeyi kaplayacak şekilde hücre yerleştirilememektedir.

Güneş panelleri uydunun yörüngesine bağlı olarak farklı güneş ışığı değerleri ile karşılaşacağı için farklı değerlerde güç çıkışı verecektir. Değişik güneş ışığı ve çıkış gücü değerlerine bağlı olarak üretilen enerji ne kadar farklı olursa olsun uydunun işlevselliği korunmalıdır.

Bu işlevselliğin korunması ve uydunun kullanılamaz hale gelmemesi için güç seviyelerine bağlı olarak farklı durumlar ve senaryolar oluşturulmuştur. Bahsi geçen durumlar üç tanedir.

Normal durum: Küp uydunun tüm sistemlerinin çalıştığı ve de hiçbir güç kısıtlamasının olmadığı güç durumudur.

Güvenli durum: Küp uydunun sadece yaşamsal elemanları(Haberleşme Sistemi,Uçuş Bilgisayarı,EGS,Yönelim Belirleme Sistemi vb.) ve de gerekli bazı duyargaların çalıştığı güç durumudur. Güç tasarrufu amacıyla oluşturulmuştur.

Toparlama durumu: Bu güç durumunda uçuş bilgisayarı, kritik alt sistemler (EGS,Uçuş Bilgisayarı,Haberleşme Sistemi) hariç tüm uydu sistemlerini kapatmakta ve pillerin uygun gerilim seviyesine kadar şarj olmasını beklemektedir.

Belirlenen güneş hücrelerinin kullanılması durumu,farklı güç durumları ve olası yörüngelere bağlı olarak yapılan benzetimlerde elde edilen sonuçlar ve üretim değerleri Tablo-1 de verilmiştir. Benzetim sonuçlarına bağlı olarak, bahsi geçen tüm durumlarda güç bütçesi pozitif güç payına sahipken, en kötü güç durumu olan 12-12 yörüngesinin, normal durumu için 1,98 W üretime sahipken, güç payı %-35 olmaktadır.

YÖRÜNGE	DURUM	ÜRETİM
Uydu İçerisindeki Kayıplar İhmal Edildiğindeki Benzetim Sonuçları		
11-11	Güvenli	3,95 W
	Toparlanma	3,80 W
	Normal	3,06 W
12-12	Güvenli	3,85 W
	Toparlanma	3,50 W
	Normal	2,42 W
Uydu İçerisindeki Kayıplar Hesaba Katıldığı Benzetim Sonuçları		
11-11	Güvenli	3,24 W
	Toparlanma	3,12 W
	Normal	2,51 W
12-12	Güvenli	3,16 W
	Toparlanma	2,87 W
	Normal	1,98 W

Tablo 1: Güneş Pilleri Benzetim Sonuçları

Elektrik Depolama Birimi (Piller): Uydu bir yörünge boyunca dünyanın gölgesine girip yeterli güneş ışığı alamayarak elektrik üretmediği veya üretilen enerjinin tüketilen enerjiyi karşılamadığı durumlarda, elektrik güç sistemi pillerden beslenir. Tüm alt sistemlerin bir çalışma periyodu bulunduğu göz önüne alınırsa, küp uydunun tüm yörünge periyodu boyunca elektrik enerjisi ihtiyacı

doğmaktadır (Örneğin, MNLP bilimsel yükünün her 1 dakikada bir ölçüm yapması isterler arasında bulunmaktadır).

İlk etapta piyasada olan Clyde Space firmasına ait pil sisteminin kullanılması planlanmaktadır fakat yeterli zaman olması durumunda uydu için özel bir pil sisteminin tasarlanması olası bir durumdur. Uydu için 30Wh enerji kapasitesine sahip, Li-ion piller kullanılacaktır. Pillerin seri bağlanması sonucu bara gerilimi pillerin tamamıyla dolu olduğu durumda 8.3V olacaktır [Strain, 2013].

Elektrik Kontrol ve Dağıtım Birimi: BeEagleSat küp uydusunda, elektrik güç sistemi olarak Clyde Space firmasının hazır ürün olan elektrik güç sistemi kullanılacaktır. Elektrik kontrol ve dağıtım birimi bu ürün içinde bulunmaktadır.

Güneş panellerinin çıkış geriliminin karakteristiğinin sürekli en yüksek verimde olmamasından dolayı bu veriminin maksimize edilerek sistemin daha sabit ve düzgün çalışması için kontrol birimi elektrik güç sisteminin içinde dâhili olarak bulunmaktadır [Strain, 2013]. Kontrol birimi sadece güneş panellerinden gelen gerilimi düzenleyerek sistemi maksimum verimle çalıştırmaya yeterli olmaz. Bunun için ayrıca pilin şarj ve deşarj durumunu kontrol ederek uydu ömrünü uzatmaktadır.

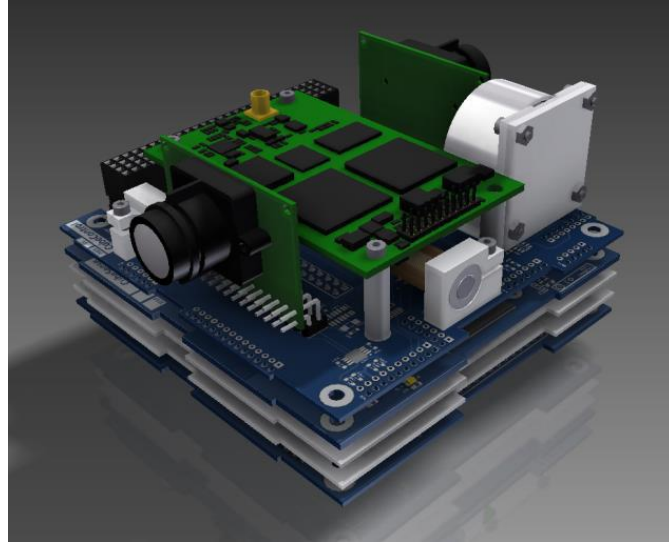
Kontrol birimi ayrıca uydu için hayati öneme sahip olan belirli gerilim seviyelerinin üretilmesi ve denetlenmesinden de sorumludur. Bu 5V ve 3.3V hatlarında gerilim dalgalanması ve de kısa devreye karşı korumalar oluşturularak bir hata ya da sorun durumunda tüm uydunun işlevsiz hale gelmesini engellemekte ve tekrar uydunun ömrünü uzatmaktadır.

Elektrik sistemi kontrol birimi, uçuş bilgisayarı ile de sürekli iletişim halindedir. Bu sayede gerekli olan gücün aktarılması ve de kritik durumlarda tüketimin azaltılarak önceliği olan yerlere aktarılması amaçlanmaktadır.

Yönelim Belirleme ve Kontrol Alt Sistemi

BeEagleSat küp uydusunun ana görevi olan, alçak yörünge atmosferik yoğunluk ölçümü görevini başarıyla gerçekleştirebilmesini ve uydunun ömrünün olabildiğince uzun olmasını sağlamak üzere 3 ekseninde yörünge kontrol sistemi kullanılmaktadır. QB50 projesi isterleri 5 derece ile yönelim belirleme ve 15 derece ile yönelim kontrol doğruluğu gerektirmektedir. [Singarayar, 2013]. Aynı zamanda bu alt sistem sayesinde, uydunun 1 birimlik yüzeyi yörünge hız vektörü doğrultusunda tutulacağından, atmosferik sürüklenme kuvveti en aza indirilmekte ve küp uydunun görev süresi uzamaktadır. Tüm küp uydular proje amacı nedeniyle alçak irtifa yörüngesine yerleştirileceğinden atmosferik sürüklenme kuvvetinin etkisi çok büyük olmakta ve önlem alınmadığı takdirde görev süresini ciddi bir şekilde kısaltmaktadır.

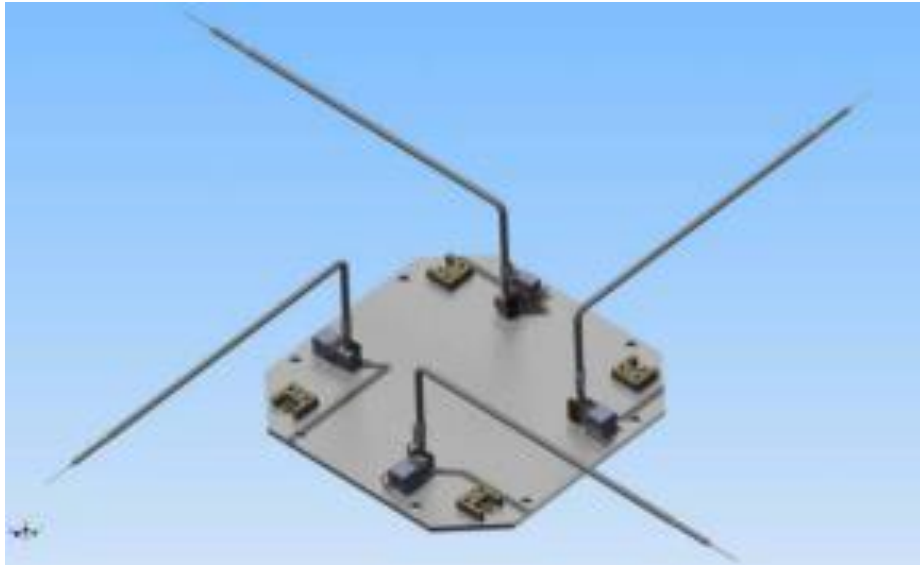
Belirtilen hassasiyette yönelim pasif elemanlardan olan manyetik burucular ile tek başına sağlanamaz. Buruculara ek olarak 1 ekseninde tepki tekerleri kullanılmaktadır. Ayrıca uydunun yöneliminin ve konumunun belirlenebilmesi için ufuk duyargaları, güneş duyargaları ve manyeto metre bulunmaktadır. İhtiyaçları karşılayacak olan yönelim belirleme ve kontrol sistemi "Surrey Space"den temin edilecektir [Visagie, 2014]. Belirtilen sistem yeni geliştirilmiş olup Haziran 2014'de deneme için QB50 projesi, kapmasında bilimsel faydalı yükler ile beraber yörüngeye gönderilmiştir [Rotteveel, 2014].



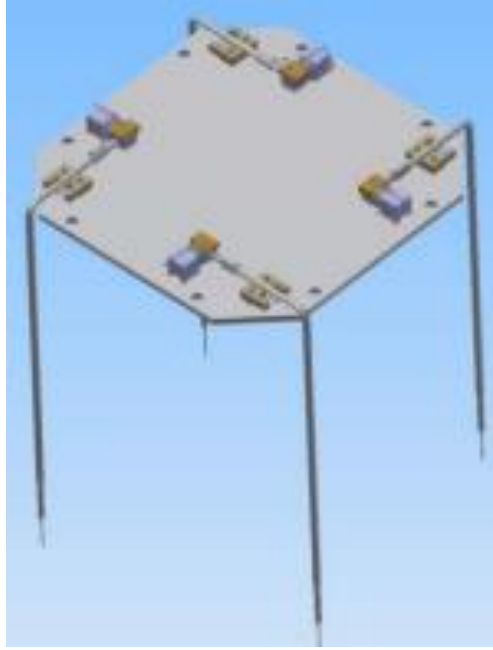
Şekil 7: Uydü Yönelim Belirleme ve Kontrol Alt Sistemi [Visagie, 2014].

Bilimsel Faydalı Yükler

Multi Needle Langmuir Probe (MNLP): Atmosferin yoğunluğunu, sıcaklığını ve elektriksel potansiyelini ölçen algılayıcı sistemidir [Bekkeng, 2013]. MNLP sistemi, toplam dört adet Langmuir probundan oluşmaktadır ve 10 kHz'e kadar sıklıkla ölçüm alabilmektedir. Otomatik kazanç kontrolü ile 1 μ A ile 1 nA arasında çözünürlüklerle elektriksel yük akımı ölçebilmektedir. Uydunun birincil faydalı yükü olan MNLP alt sistemi, alçak yörüngedeki atmosferik özelliklerin belirlenmesinde kullanılacaktır.



Şekil 8: MNLP Sisteminin Probe'larının Açılmış Halinin Üç Boyulu Çizimi [QB50, 2013]



Şekil 9: MNLP Sisteminin Probe'larının Kapalı Halinin Üç Boyulu Çizimi [QB50, 2013]

X-Işını Algılayıcısı Sistemi: BeEagleSAT ikinci faydalı yük olarak bir X-ışını algılayıcısı (XRD) taşımaktadır. XRD, CdZnTe yarıiletken kristal, kristalin üzerine ve altına birbirine dik olarak döşenmiş şerit elektrotlar, özel elektronik okuma devresi (RENA-3b ASIC), analog/dijital çevirici, yüksek gerilim kaynağı ve diğer gerilim devrelerinden oluşur. XRD gücünü 7 adet yüksek kapasiteli pilden alır.

CdZnTe ve türevi yarıiletken algılayıcı sistemleri x ışını uzay teleskoplarında daha önce kullanılmıştır. Örnek olarak Swift-BAT [Barthelmy, 2005] uydusu verilebilir. Bu tip algılayıcılar küp uydularda da denenmiş olsa da (AAUSAT-2 [Earth Observation Portal, 2014] ve Cosmic X ışını Background Nanosat CXBN [Earth Observation Portal, 2014]) iki sistemden de bilimsel veri geri dönüşü olamamıştır.

BeEagleSAT üzerine yerleştirilecek XRD üzerindeki çapraz şerit elektrot konfigürasyonu kristal üzerinde pozisyon çözünürlüğüne, dolayısıyla uygun bir maske ile görüntüleme yapmaya uygundur. Yer ve ağırlık kısıtları yüzünden maske kullanılmayan XRD sisteminin ana amacı tüm okuma kanallarını test etmek ve düşük güçle çalışan, x ışını teleskobu olmaya hazır sistemin alçak yörünge de çalıştığını göstermek, ve düşük yörünge de 20-200 keV arkaalan ışınmasını ölçmektir.

Kristal anot ve katot şeritleri RENA-3b okuma devresine bağlanmaktadır. RENA 3b düşük gürültülü, 36 kanallı, kendi kendini tetikleyebilen ve tekrar başlatabilen, yük okumaya hassas yükseltici ve düzenleyici bir devredir [Tumer, 2008]. RENA, tetiklenen kanalları MSP mikrokontrolcüye iletir, MSP de bu kanalların analog çıkışlarını analog/dijital çevirici (ADC) ile sıra ile okuyarak kaydeder. Uçuş öncesi yapılacak kalibrasyon kullanılarak ADC çıkışları enerjiye çevrilir. Çalışma moduna bağlı olarak tüm veriler saklanabildiği gibi, kalibre edilmiş veriler tayfa çevrilerek sistemdeki SD kartında saklanabilir. Uydu veri iletişimi için hazır olduğunda mikrodenetleyiciye gönderilen bir kesme XRD'den haberleşme modülüne veri aktarımını başlatacaktır.

Yedi adet SOCI2 yüksek kapasiteli pil gerekli gücü sağlamaktadır. Böylece uydu güç sisteminden bağımsız bir alt sistem olarak çalışmaktadır. Yeniden doldurulamayan bu pillerle yeterli gücü sağlamak için sistem belli aralıklarla açılıp kapatılacaktır. Güç devrelerinin teorik verimliliğini kullanarak yaptığımız hesaba göre sistem 140 saat boyunca çalışabilmektedir.

Tüm gerilim devreleri vakum-termal testlerinden ve elektriksel testlerden başarı ile geçmiştir. Tüm devre elemanlarını ve kristali taşıyacak baskı devre üretilmiş ve mekanik testlerden başarıyla geçmiştir.

SONUÇ

Avrupa Birliği FP7 programı QB50 projesi kapsamında geliştirilmekte olan iki birim BeEagleSat küp uydusunun tasarım ve geliştirme sürecinde bir çok milli akademik ve sanayi kurum ve kuruluşu uluslararası ortakları ile eşgüdüm içerisinde uzay tecrübelerini projeye aktarmaktadır. Uydu tasarımı sonlanmış, kritik tasarım aşaması başarı ile tamamlanmıştır. Diğer 49 proje uydusu ve BeEagleSat birlikte alçak yer yörüngesindeki termosfer tabakasında proje kapsamında ana konsorsiyum tarafından geliştirilmekte olan duyargalar ile ortam ölçümleri yapacak, yapılan ölçümler dünya çapındaki yer istasyonları tarafından toplanacak ve toplanan bu bilgiler ortaklar arasında paylaşılarak daha doğru atmosfer modellemeleri gerçekleştirilecektir. Proje kapsamında yerli firmalar ve proje ekibi tarafından üretilen tüm alt sistemlerin uzay ortamı(TVAC) ve titreşim testleri gerçekleştirilmiş ve testler boyunca sistemler gerekli görevleri yerine getirmişlerdir. QB50 sisteminin 2016 yılı ilk yarısında fırlatılması öngörülmektedir. Böylece küp uydular doğrudan uzaya ana yük olarak erişim sağlamış olacaktır.

Kaynaklar

ARM, 2014. *ARM Cortex-M3 Mikrodenetleyicileri Ana Sayfası*, Site: <http://www.arm.com/products/processors/cortex-m/cortex-m3.php>

AslanA.R. ve diğerleri, 2013. *Development of a LEO Communication CubeSat*, 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies-RAST2013, İstanbul, 12-14 Haziran

BarthelmyS. ve diğerleri., 2005. *The Burst Alert Telescope (BAT) on the SWIFT Midex Mission*, Space Sci. Rev., 120, p. 143.

BekkengT.A., 2013. *QB50-UiO-ID-0001 M-NLP ICD*, Sayı 3,Oslo Üniversitesi, Aralık (www.qb50.eu)

Earth Observation Portal, 2014. Site: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cxb>

Clyde Space, 2014. <http://www.clyde-space.com/documents/1902>

Earth Observation Portal, 2014. Site: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/a/ausat-2>

İTÜ RF Lab, 2011. *TÜRKSAT 3USAT Anten Kritik Tasarım Raporu*, İstanbul, Türkiye.

QB50, 2014. Site: www.qb50.eu

QB50, 2013. Site: www.qb50.eu, https://www.qb50.eu/download/workshop/workshop5th/5_5thQB50WS-ScienceUnits_and_Sensors.pdf

Rotteveel J., ElstakJ. and ThoemelJ., 2014. *The QB50 Precursor Flight*, Site: <https://www.qb50.eu/index.php/precursor-flight>

SILABS, 2014. *Si4464/Si4463/Si4461/Si4460 Kullanıcı El Kitabı*, Site: <http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/Si4464-63-61-60.pdf>.

SILABS, 2014. *Si446x Programlama Rehberi*, Site: <http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/AN633.pdf>.

SingarayarF., 2013. *QB50 System Requirements and Recommendations, Issue 5*, The von Karman Akışkan Dinamiği Enstitüsü, 11 Ekim 2013.

StrainA., 2013. *User Manual: CubeSat 3U Electronic Power System CS-3UEPS2-NB*, Clyde Space Ltd.

TümerT.O., ve diğerleri, 2008. *Performance of RENA-3 IC with Position-Sensitive Solid-State Detectors*, Proc. SPIE 7079, p.70791F.

ÜmitM.E., 2012. *Design of a Redundant OBC and MODEM for CubeSats*, Yüksek Lisans Bitirme Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ocak

VisagieL.,2014. *ADCS Interface Control Document V3.0*, Surrey Space Center,18 Haziran, İngiltere