

## CEPUYDU İLE OPTİK HABERLEŞME

İrem BİLEN<sup>1</sup>  
Bengisu TİNEL<sup>2</sup>  
Tuğcan BAŞ<sup>3</sup>  
Feyza TORUN<sup>4</sup>  
Bayram SAVLI<sup>5</sup>  
Uğur Murat LELOĞLU<sup>6</sup>

Uzay Mühendisliği Bölümü, Havacılık ve Uzay  
Bilimleri Fakültesi, Türk Hava Kurumu  
Üniversitesi, Ankara

### ÖZET

*Türk Hava Kurumu Üniversitesi Uzay Mühendisliği Bölümünde başlatılan bir uydu projesi kapsamında, bir cepuydunun bir küpuydudan ayrılması ve bu iki uydunun kontrollü şekilde kol uçuşu gerçekleştirilmesi öngörülmüştür. Bu bildiriye, ana projenin parçası olarak başlanan küpuydu çalışması ve optik haberleşme deneyi anlatılmaktadır. Açık kaynak kodlu DynOSSAT-EDU v1.0 cepuydu tasarımı hakkında bilgi verildikten sonra, uydunun üretimine yönelik çalışmalar ile küpuydu ve cepuydu arasında planlanan tek yönlü optik haberleşme bağlantısı açıklanmıştır. Ayrıca, cepuydu için yapılan mekanik tasarım ve bu tasarıma yönelik analizler de gösterilmiştir. Optik iletişim bağlantısı Arduino kartları kullanılarak test edilmiştir. Daha hızlı bir link ise cepuydu üzerine eklenecek bir kart üzerinde gerçekleştirilecektir.*

### GİRİŞ

Nano ve piko uydu teknolojisindeki gelişmeler, bu düşük maliyetli uyduların uzay araştırmalarında kullanımını mümkün kılmıştır. Bu uydular, teknoloji gösterimi ve eğitim gibi alanlar dışında operasyonel amaçlarla da kullanılmaktadır. Türk Hava Kurumu Üniversitesi Uzay Mühendisliği Bölümünde başlatılan bir uydu projesi kapsamında, bir cepuydunun bir küpuydudan ayrılması ve bu iki uydunun kontrollü şekilde kol uçuşu gerçekleştirilmesi öngörülmüştür. Bu bildiriye, ana projenin parçası olarak başlanan küpuydu çalışması ve optik haberleşme deneyinde gelinen aşama anlatılmaktadır.

Yüksek derecede küçültülmüş uydular olan cepuydular, 1P olarak adlandırılan 5 cm x 5 cm x 5 cm'lik temel şekle dayanır. Birden fazla temel şekil kullanılarak 2P veya 3P boyutlarında cepuydular da yapılmaktadır. Bu uydular, çok düşük maliyetleri ve geliştirme süreleri nedeniyle, küpuydularından bile daha erişilebilir uzay araştırması ve keşfi imkanı sağlamaktadır [Duysal, Dursun, Tuzcu, Atılğan, Uslu ve Doğan, 2019].

<sup>1</sup> Öğr., Uzay Müh. Böl., E-posta: s190222013@stu.thk.edu.tr  
<sup>2</sup> Öğr., Uzay Müh. Böl., E-posta: s190222024@stu.thk.edu.tr  
<sup>3</sup> Öğr., Uzay Müh. Böl., E-posta: s190222042@stu.thk.edu.tr  
<sup>4</sup> Öğr., Uzay Müh. Böl., E-posta: s200222029@stu.thk.edu.tr  
<sup>5</sup> Öğr., Uzay Müh. Böl., E-posta: s200222017@stu.thk.edu.tr  
<sup>6</sup> Prof. Dr., Uzay Müh. Böl., E-posta: umleloglu@thk.edu.tr

Optik haberleşme teknolojisi ise geleneksel radyo frekansı tabanlı haberleşme sistemlerine alternatif olarak yüksek verimlilik ve bant genişliği sunmaktadır. Giderek zorlaşan frekans tahsisi problemini de çözmekte ve küçük uydu platformlarında iletişim kapasitesini artırmak için önemli bir fırsat sunmaktadır.

Bu çalışmada, cepuydu tasarımı hakkında bilgi verildikten sonra küpuydu ve cepuydu arasında planlanan tek yönlü optik haberleşme bağlantısı açıklanacaktır. Uydu platformunun köşelerine yerleştirilecek LED'ler aracılığıyla, cepuydu ve küpuydu arasındaki iletişimin sağlanması planlanmaktadır.

Sonuç olarak, cep uydunun amacı, uzay aracı maliyetlerini ve karmaşıklığını azaltırken tüm alt sistemleri korumaktır [Podaru, Gracia-Sola ve Camps, 2023]. Geliştirilen cepuydu hem eğitim amacıyla kullanılacak hem de ileride geliştirilecek olan ana uzay görevi için teknolojik altyapı oluşturacaktır. Söz konusu görev sırasında denenecek olan optik bağlantının daha gelişmiş sürümlerinin ise daha sonraki görevlerdeki teknolojik ihtiyaçları karşılaması planlanmıştır. Bu çalışma, akademik ve teknik açıdan heyecan verici bir adımdır ve gelecekteki nano ve piko uydu görevleri için değerli bir referans noktası olacaktır.

## GENEL BİLGİLER

### Cepuydu Platformu

Cepuydu için açık kaynaklı cepuydu platformlarından seçilmesine karar verilmiştir. Böylece, platform geliştirme yerine görev yükü olan optik haberleşmeye odaklanmak mümkün olacaktır. Açık kaynaklı cepuydu platformlarından CC-BY-SA lisanslı DynOSSAT-EDU v1.0 [Casado, 2020] proje amaçlarına uygun bulunarak seçilmiştir.

DynOSSAT-EDU Sistemi, Libre Space Foundation'ın PQ60 form faktörünü (Becnel, McAndrew, Strass, Walkinshaw ve Worrall, 2015) kullanan, ancak PQ60 konektörü yerine 1.27 mm 40-bacaklı konektör ile donatılmış üç bağımsız karttan oluşmaktadır. Her kart, cep uydunun alt sistemlerinin belirli işlevlerini yerine getirmektedir [Casado, 2020]:

1. OBC (On-Board Computer, Uçuş Bilgisayarı): Bu kart, bir ivmeölçer, manyetometre ve dönüölçer içeren bir IMU (Inertial Measurement Unit, Ataletsel Ölçüm Birimi), bir sıcaklık algılayıcı ve bir çoklu gaz algılayıcı içermektedir. Merkezi işlemci olarak ATSAMD51 mikrodenetleyici kullanılmaktadır.
2. EPS (Electrical Power System, Elektrik Güç Sistemi): Bu kart, batarya yönetimi ve güç dağıtım sistemlerini birleştirir. Güneş panelleri aracılığıyla şarj işlemleri uzayda kanıtlanmış MPPT (Maximum Power Point Tracker, Maksimum Güç Noktası İzleyici) elektronik bileşenleri ile gerçekleştirilir. Genel yönetim için ATSAMD21 mikrodenetleyicisi kullanılmaktadır.
3. SatComm: Bu kart, LEO-Dünya iletişimini simüle etmek için uzun menzilli bir LoRa modülü ve LEO-LEO iletişimini simüle etmek ve mobil uygulamalarla iletişim sağlamak için 2.4 GHz PAN modülü içermektedir.

OBC ve EPS kartları, CircuitPython ve Arduino çerçeveleri ile tamamen uyumludur. nRF52832 modülü ise CircuitPython desteğine sahip olmadığından, yerel nRF52 SDK, mBed OS veya Arduino çekirdeği kullanılması gerekmektedir. Ayrıca, sistemde bir dördüncü kart olan konektör kartı bulunmaktadır. Bu kart, 1.27 mm PQBH veri yolunu iki 2.54 mm konektöre böler ve çevre cihazlarına dupont kablolarıyla bağlantı sağlar.

### DynOSSAT-EDU-OBC Uçuş Bilgisayarı

EDU-OBC, alçak Dünya yörüngesinde (LEO) çalışan bir cepuydu için gerekli tüm modülleri içermektedir. Bu kart, uyduyu yönetmek ve algılayıcı verilerini işlemekten sorumludur. Teknik bilgiler Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Uçuş bilgisayarının teknik özellikleri

ATSAMD51J20A-AU 120 MHz Cortex-M4F işlemci, 1 MB flash ve 256 KB RAM
32 Mbit SPI flash (CircuitPython kodu ve kütüphaneleri depolamak için kullanılır)
Yüksek hassasiyetli ICM-20948 ivmeölçer, dönüölçer ve manyetometre içeren IMU
MCP9808 sayısal sıcaklık algılayıcı
SGP30 TVOC ve eqCO2 hava kalitesi algılayıcı
Kullanıcı tarafından kontrol edilebilen WS2812B adreslenebilir RGB LED
Ayrı 5V ve 3.3V güç baraları
Veri depolama için MicroSD kart yuvası
Güç ve veri kaydı için USB-C 2.0 konektörü
PQB40 veri yolu (10 sayısal bacak, 6 analog bacak, I2C veri yolu, SPI veri yolu ve UART bağlantı noktaları içerir)

### DynOSSAT-EDU-EPS Elektriksel güç sistemi

EDU-EPS, alçak Dünya yörüngesinde çalışan bir cepuydu için batarya yönetimi ve güç dağıtım sistemlerini içermektedir. Güneş panelleri aracılığıyla şarj işlemleri, uçuşta kanıtlanmış MPPT elektronik bileşenleri ile gerçekleştirilir. Teknik bilgiler Tablo 2’de özetlenmiştir.

Tablo 2. Elektriksel güç sistemi teknik özellikleri

ATSAMD21E18 48 MHz Cortex-M0 işlemci, 256 KB flash ve 32 KB RAM
32 Mbit SPI flash (CircuitPython kodu ve kütüphaneleri depolamak için kullanılır)
Güç yönetimi için SPV1040 MPPT IC, güneş hücreleri
L6924D düşük giriş voltajlı lityum batarya şarj yönetimi IC (SPV1040 ile uyumludur)
Yüksek performanslı DC/DC dönüştürücüler aracılığıyla üretilen 5V ve 3.3V güç baraları
Batarya Akım/Voltaj/Güç ölçümü için INA226
TPS22918 ile geriye güç verme koruması ve yük anahtarlama
Kullanıcı tarafından kontrol edilebilen WS2812B adreslenebilir RGB LED
Güç ve veri kaydı için USB-C 2.0 konektörü
Batarya ve güneş hücreleri için standart Molex Picoblade 1.5 mm konektörler
OBC ile SPI/I2C/UART üzerinden veri iletişimi ve/veya yedeklilik

### DynOSSAT-EDU-Comms Haberleşme sistemi

EDU-Comms, alçak Dünya yörüngesinde çalışan bir cepuydu için iletişim modüllerini içermektedir. Bu kart, radyo iletişimini yönetmekte ve LEO-Dünya iletişimini simüle etmek için LoRa modülü ile LEO-LEO iletişimini simüle etmek ve mobil uygulamalarla iletişim sağlamak için 2.4 GHz nRF52832 SoC (System on Chip) içermektedir. Teknik bilgiler Tablo 3’te özetlenmiştir.

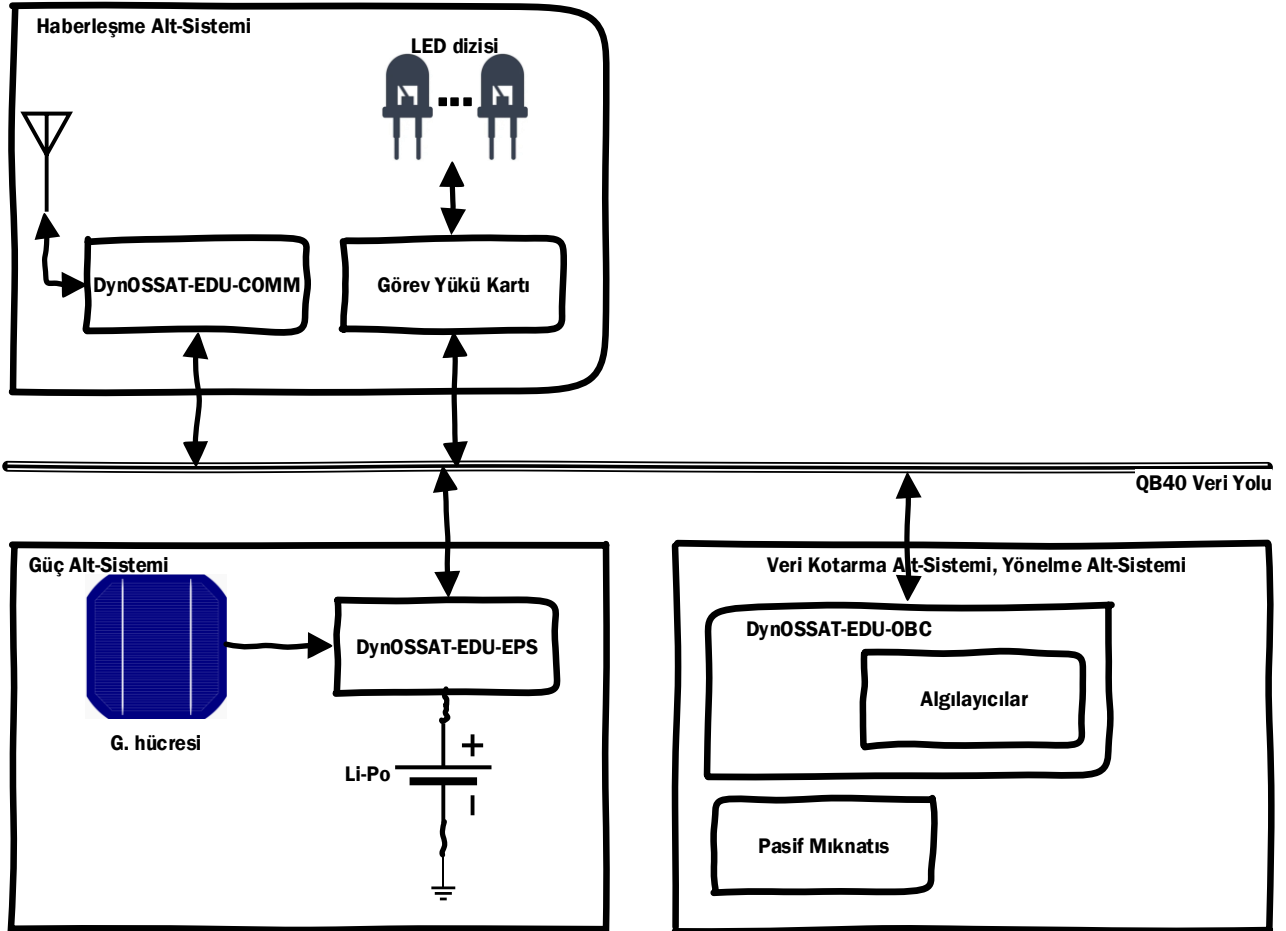
Tablo 3. Haberleşme sistemi teknik ayrıntıları

HopeRF RFM96W 868 MHz LoRa modülü (433 MHz RFM95W versiyonuyla uyumlu)
SPI veri yolu
Nordic Semi nRF52832 tabanlı SKB369 2.4 GHz SoC (bağımsız veya yedek işlemci olarak çalışabilir)
Güç ve veri kaydı için USB-C 2.0 konektörü (CH340E USB-UART köprüsü)

## UYGULAMALAR VE BULGULAR

### Cepuydu

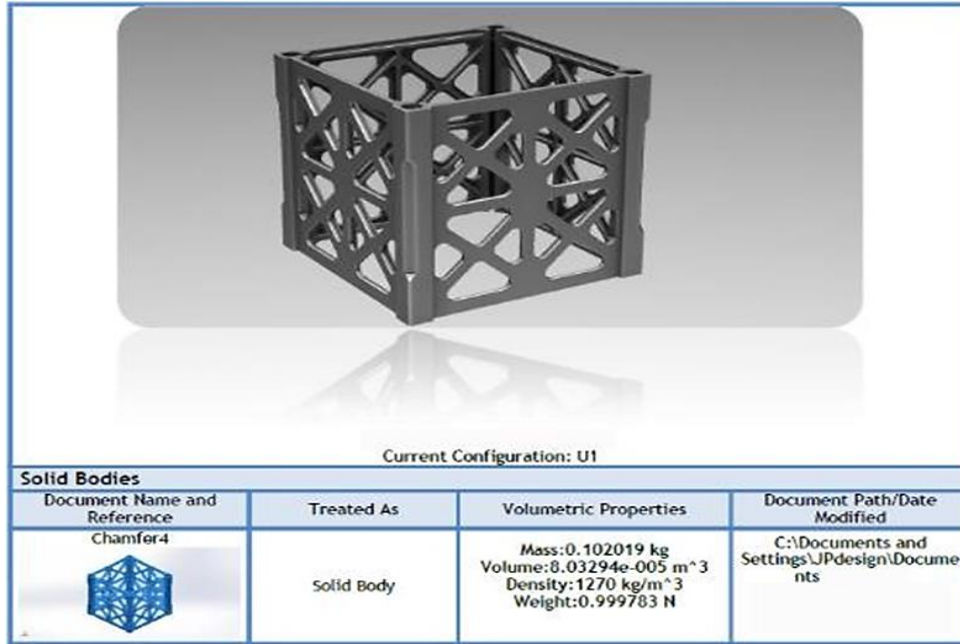
DynoSSAT-EDU v1.0 sistemi PCB'leri ürettirilmiş ve komponentler mikroskop altında lehimlenmiştir. Uçuş modeli veya çevresel testlerde kullanılacak bir model olmadığı için temiz odada ve ECSS standartlarına uygun olarak üretim yapılmamıştır. Henüz tedarik edilemeyen komponentler nedeniyle tüm üretim henüz sonlanmamıştır. Konektör için kullanılan dördüncü PCB yerine optik haberleşme görev yükünü ve olası başka yükleri taşımak üzere ayrı bir PCB konulması planlanmıştır. Sistemin blok şeması Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Cepuydunun blok diyagramı

### Yapısal Tasarım

Çalışmanın bu kısmında, cepuydunun, fırlatma sırasındaki titreşim yüklerine dayanabilecek, küpuydu içindeki bırakma mekanizması ile uyumlu, 50x50x50 mm boyutlarındaki 1P cepuydu standardında ve mümkün olduğunca hafif mekanik yapısı tasarlanmış ve ULTEM 1010 malzemesinden üç boyutlu baskı ile üretilmiştir. Analiz ve katı modelleme için SolidWorks yazılımı kullanılmıştır. Tasarım Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Model Bilgisi

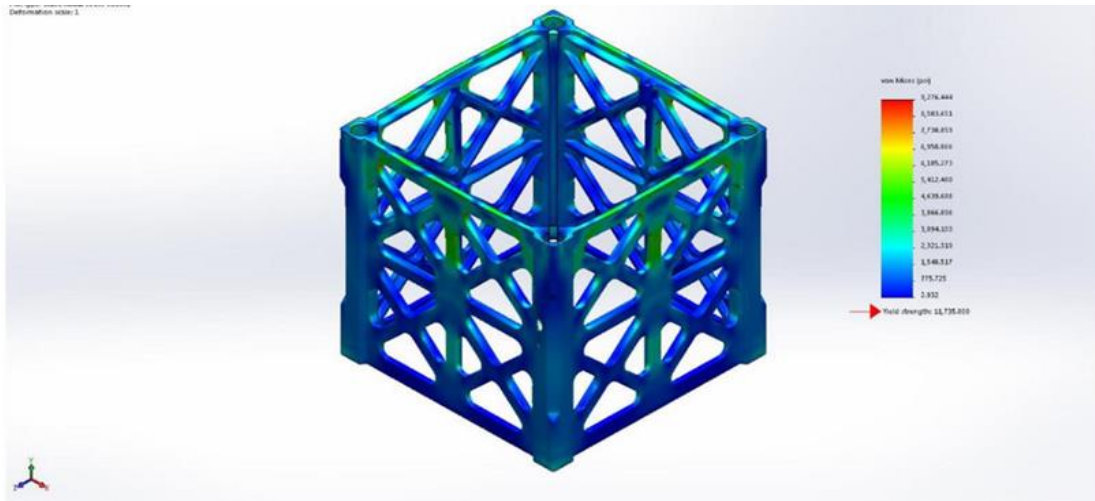
### Malzeme Özellikleri

ULTEM 1010 yüksek mukavemet, termal stabilite ve kimyasal direnç gibi mekanik özelliklere sahiptir. Bu özellikler, uzayın zorlu koşulları için gereklidir. Ayrıca, ULTEM 1010'un yüksek bir ısı sapma sıcaklığı vardır, bu da onu önemli sıcaklık değişikliklerine sahip ortamlarda kullanım için uygun kılar (Finckenor ve McElderry, 2023). Nihai test sonuçlarına göre geleneksel alüminyum alaşımlarına geri dönülebilir.

### Gerilme Analizi

Statik gerilme analizi, SolidWorks yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Analizde, cep uydunun yapısal dayanıklılığı ve mukavemeti değerlendirilmiştir. Şekil 3'te, Von Mises gerilme dağılımını göstermekte olup, renk skalası modeldeki gerilme yoğunluğunu belirtmektedir.

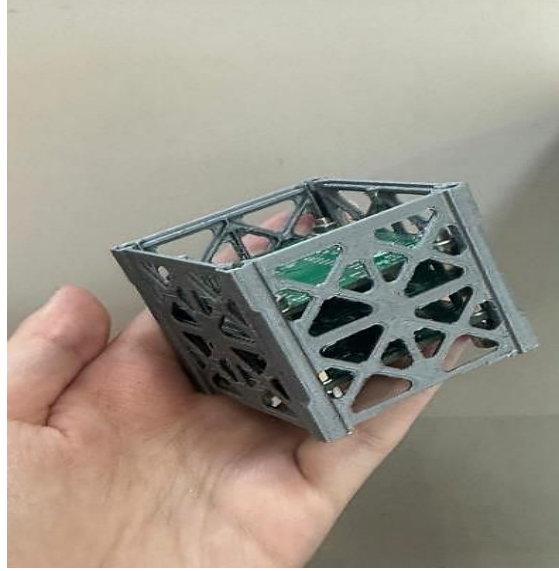
Maksimum gerilme değeri 9276.44 psi, minimum stres değeri 2.93188 psi hesaplanmaktadır. Kırmızı renk yüksek gerilme bölgelerini, mavi renk ise düşük gerilme bölgelerini temsil etmektedir. Titreşim analizleri ayrıca yapılacaktır.



Şekil 3. Von Mises gerilme analizi sonucu

### Üretim

Bu çalışma kapsamında tasarımı ve analizleri sunulan cepuydu üçboyutlu yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Üçboyutlu baskının avantajlarından olan maliyet, esneklik ve özelleştirme, bu çalışma için göz önünde bulundurulmuş tercih sebeplerinden olduğu söylenebilir. Üçboyutlu baskı, CNC işleme gibi geleneksel yöntemlere göre daha maliyet etkin ve karmaşık modelleri üretebilen bir üretim yöntemi olduğu düşünülmüştür. Şekil 4'te cep uydunun üretimden sonra insan eli üzerinde karşılaştırması gösterilmiştir.



Şekil 4. Cep uydunun baskıdan çıkartılmış görüntüsü

### **Optik Haberleşme Uygulaması**

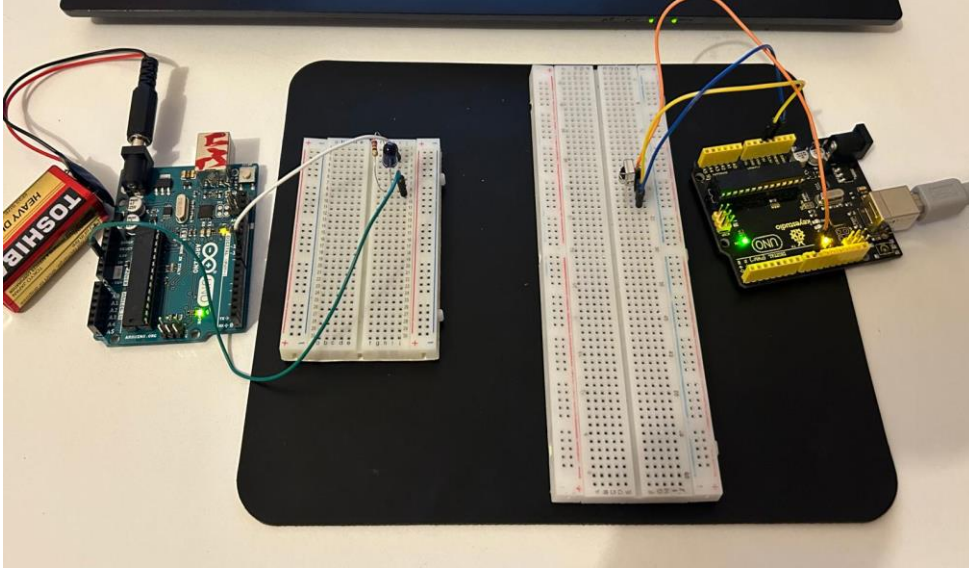
Çalışmanın bu kısmı, küpuydu ile cepuydu arasındaki optik iletişimi göstermeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın uygulanabilirliğini ve güvenilirliğini kanıtlamak amacıyla, iki Arduino arasında sıcaklık verilerini ve "THKU" mesajını kızılötesi sinyaller kullanarak ileten optik iletişim kapsamaktadır.

Haberleşmenin fiziki seviyesi için TSAL6200 940 nm kızılötesi LED, alıcı tarafında ise VS1838B kızılötesi alıcı kullanıldı. 38 kHz'lik taşıyıcı işareti Arduino tarafından üretildi ve modüle edildi. Alıcı çip VS1838B, 70 derece açıdan alışı yapabilen bir foto-diyot içermektedir ve işareti işleyip çıkışta demodüle edilmiş sayısal işaret göndermektedir. Veri bağı seviyesinde ise kendi kararlaştırdığımız basit bir çerçeve yapısı oluşturulmuştur.

Sistem, LM35 sıcaklık algılayıcısının analog çıkışını sayısal bir değere dönüştürüldükten sonra Celsius derece cinsinden sıcaklığa çeviren ve bu verileri bir mesaj çerçevesi ile kızılötesi LED kullanarak gönderen bir verici Arduino ile, gelen kızılötesi sinyallerini okuyan ve sıcaklık verilerini çözüp bunları seri monitöre yazdıran alıcı Arduino'dan oluşmaktadır.

### Optik Haberleşme Bulguları

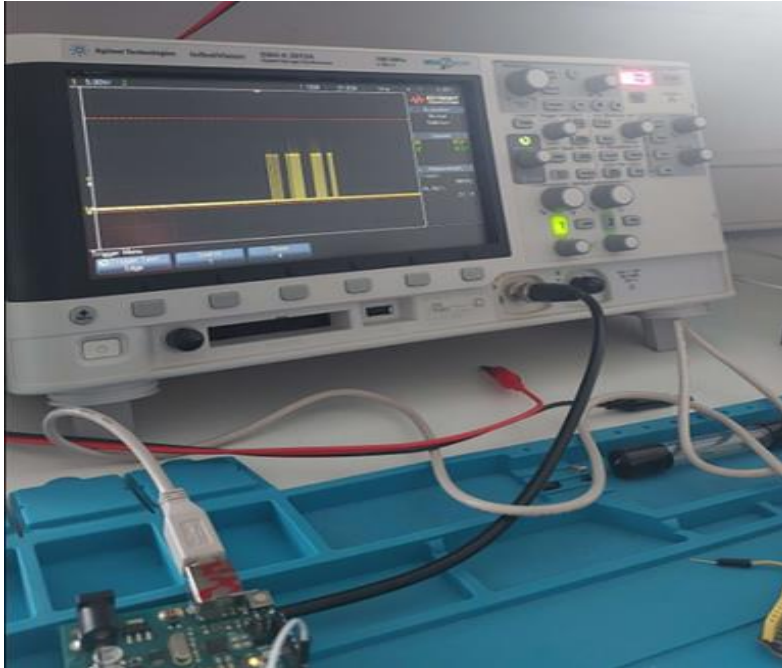
Şekil 5, optik iletişim sisteminin kurulumunu göstermektedir. Bu düzenek, verilerin ışık sinyalleri kullanılarak iletiildiği ve alıcı devresi tarafından doğru bir şekilde alınıp çözüldüğü optik iletişim prensiplerini etkili bir şekilde göstermektedir.



Şekil 5. Optik Haberleşme Sistemi

İncelenen sonuçlar, sıcaklık verilerini ve bir mesajı ("THKU") iletmek için kızılötesi sinyalleri kullanarak iki segment arasındaki optik iletişimi göstermektedir. Verici, sıcaklık değerini okur ve bunu bir kızılötesi LED kullanarak mesajla birlikte gönderir. Alıcı, gelen kızılötesi sinyallerini okur, sıcaklık verilerini ve mesajı çözer ve bunları seri monitöre yazdırır.

Optik haberleşme esnasında araya katı bir nesne konulduğunda haberleşmenin kesilmesi de osiloskop kullanılarak gözlemlenmektedir (Şekil 7).



Şekil 6. Osiloskop Monitörü

## SONUÇ

Türk Hava Kurumu Üniversitesi Uzay Mühendisliği Bölümünde başlatılan bir uydu projesi kapsamında öngörülen bir cepuydunun bir küpuydudan ayrılması ve kol uçuşu gerçekleştirilmesi projesi kapsamında, ana projenin parçası olarak başlanan küpuydu çalışması ve optik haberleşme

deneyi anlatılmıştır. Yukarıda, açık kaynak kodlu DynOSSAT-EDU v1.0 cepuydu tasarımı hakkında arkaplan bilgisi verildikten sonra, gerçekleştirilen cepuydunun üretimine yönelik çalışmalar açıklanmış, cepuydu için yapılan mekanik tasarım ve bu tasarıma yönelik analizler de gösterilmiştir. Ardından küpuydu ve cepuydu arasında planlanan tek yönlü optik haberleşme bağlantısı hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca, optik iletişim bağlantısı Ardiuno kartları kullanılarak test edilmiştir.

Açık kaynaklı cepuyduların eğitim amaçlı kullanım için uygunluğu açıkça görülmüştür. Düşük maliyet ile montaj, entegrasyon ve işlevsel test aşamalarının öğrencilere gösterimi açısından faydalıdır. Ayrıca, mekanik tasarım ve analizler öğrenci projeleri için uygundur. Her ne kadar cepuydunun görev yükü henüz tamamlanamamış olsa da, hazır tasarım üzerine ek yapılarak, yeni işlevler eklenebileceği ve bilimsel veya teknolojik amaçlı deneyler için kullanılabileceği görülmüştür. Uzayda optik iletişim ile ilgili deney de fiziki seviyede doğrulanmıştır.

İleride, platformun tam olarak doğrulanması, optik haberleşmenin kart üzerinde gerçekleştirilmesi ve testi ile geliştirilen sistemin derslerde tamamlayıcı olarak kullanılması gibi aşamalar bulunmaktadır. Buna ek olarak, ilerleyen süreçte cepuyduya bir kamera entegre edilmesi ve ayrılma sırasında çekilen videonun optik haberleşme linki ile küpuyduya, oradan da Dünya'ya iletilmesi planlanmaktadır. Ancak, video iletimi gibi yüksek veri aktarım hızı gerektiren uygulamalar için mevcut optik haberleşme sisteminin bant genişliği yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple, optik linkin veri kapasitesini artıracak daha geniş bir bant genişliğine ihtiyaç duyulmaktadır.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmada optik haberleşme kodlamasına verdiği değerli katkılardan dolayı Juan Jose Medina Musellas'a teşekkür ederiz.

### Kaynaklar

- Becnel, E., McAndrew, S., Strass, L., Walkinshaw, T. ve Worrall, K., 2015. *PQ 60 Standard Document version 1.1*, Rapor.
- Casado, E., 2024. GitHub - BHDynamics/dynossat-edu-obc: DynOSSAT-EDU, Educational PocketQube satellite Communication Board Files, <https://github.com/BHDynamics/dynossat-edu-obc>, Erişim tarihi: 5.5.2024.
- Duysal, M., Dursun, C. A., Tuzcu, O., Atilgan, D., Uslu, K., ve Dogan, S., 2019. *Design and Manufacture of Pocketqube For Low Earth Orbital (LEO)*. Journal of Young Scientist, cilt 7.
- Finckenori M. M., ve McElderry, J. R., 2023. *Space Environmental Effects on Additively Manufactured Materials – Results from MISSE-9 and MISSE-10*. NASA raporu NASA/TM–20230008474, Marshall Space Flight Center, Huntsville, Alabama.
- Podaru, S., Gracia-Sola, G. ve Camps, A.A., 2023. *The IEEE Geoscience and Remote Sensing Society “Open PocketQube Kit” An affordable open source approach to Earth observation missions*, IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, cilt 11, sayı 4, s. 163-170.