

Görünür Yakın Kızılötesi Spektrometre Tasarımı ve Bir Uygulama Örneği

Design of A Visible Near Infrared Spectrometer and An Application Example

Özkan AKGÜL¹, Ece Olcay GÜNEŞ²

^{1,2}Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
İstanbul Teknik Üniversitesi
ozkanakgul@itu.edu.tr¹, gunesec@itu.edu.tr²

Özet

Kızılötesi spektrometreler günümüzde sanayide, kimya ve ilaç sektöründe, tarımda ve malzeme bilimlerinde oldukça sık kullanılmaktadır. Bu ürünler genel olarak pahalı ve büyük cihazlardır. Fakat son zamanlarda taşınabilir, küçük ve daha düşük maliyetli spektrometreler de üretilmeye ve ticarileşmeye başlamıştır. Bu çalışmada görünür yakın kızılötesi spektrometre tasarımı ele alınmış ve bir uygulama örneği ile kullanım alanı ortaya konmaya çalışılmıştır. Spektrometre tasarımı sensör olarak HAMAMATSU c11708ma sensör kullanılmıştır. Atmega16 mikrodenetleyici ile sensörden alınan veriler UART üzerinden bilgisayar ortamına veya STM3210e-eval kiti aktarılmıştır. Sınıflandırma metodu için LDA yöntemi kullanılmıştır. Bilgisayar uygulaması ile LDA modeli oluşturulmuş, elde edilen model STM3210E-Eval deneme kiti üzerine taşınmıştır. Uygulama olarak, iki farklı ticari çiçek toprağının sınıflandırılmasına çalışılmış ve her türden 800'er olmak üzere toplam 1600 ölçüm alınmıştır. Sınıflandırma başarımı kalibrasyon yapıldığı durumda %100 olmuştur.

Abstract

Recently infrared spectrometers are being used in industry, chemistry and medicine, agriculture and material sciences. These products are usually large and expensive. But recently small, inexpensive and mobile spectrometers are being produced and commercialized. In this study design of a visible near infrared spectrometer is considered and one of the usage areas are shown with an example application. HAMAMATSU c11708ma mini spectrometer sensor is used as optical sensor array. Spectral data which is collected using c11708ma sensor is transferred via UART to PC or STM3210E-Eval board. LDA is used as classification method. LDA model is created by PC application and transferred to STM3210E-eval board for further classification. Two different soil types are used to collect learning data. 1600 (800 for each) different soil spectrums are collected and used as learning data to create a LDA model. Classification success is %100 while using amplitude calibration.

1. Giriş

Günümüzde kızılötesi spektroskopisi birçok alanda özellikle tarım sektöründe, meyvelerin olgunlaşması ile ilgili

ölçümlerde, çeşitli sınıflandırma süreçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bir maddenin rengi, o maddeden gözümüze ulaşan görünür bölgedeki elektromagnetik ışınlarıdır. Bu ışınlar, saydam maddeler için maddenin içinden geçenler, saydam olmayanlar için ise yansıyan ışınlarıdır. Maddenin ışığı soğurmasını incelemek için kullanılan düzeneğe soğurma spektrometresi adı verilir [1]. Spektrometreler malzeme analizinde, kimyasal laboratuvarlarda, tarımda ve birçok analiz işleminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yakın kızılötesi (Near Infrared, NIR) spektrometreler, çalışma aralığı olarak elektromagnetik spektrumun yakın kızılötesi (Near Infrared, NIR) bölgesinde olanlardır. Bunun yanında görünür bölgeler için “kolorimetreler” ve mor ötesi (Ultra Violet, UV) bölge için mor ötesi spektrofotometreler de mevcuttur. Analiz edilmek istenilen örnek, elektromagnetik spektrumun hangi bölgesinde soğurma/yansıtma karakteristiği gösteriyor ise, o bölgede çalışmak doğru olur. Toprak özellikleri ile ilgili çalışmalar yapılırken spektrumun görünür, yakın kızılötesi (Near Infrared, NIR) ve orta kızılötesi (Mid Infrared, MIR) bölgelerinde çalışmak mümkündür.

Spektroskopik yöntemlerin bu denli yaygın olarak kullanılması, buna rağmen spektral analizler için kullanılan yöntemlerin karmaşıklığı ve pahalılığı taşınabilir, düşük maliyetli ve pratik spektrometrelerin tasarımlarını gündeme getirmiştir. Literatür araştırıldığında temel ilkelere dayanan birçok farklı spektrometre tasarımı ve uygulamaları ile karşılaşılacaktır. Bir kısmı doğrudan spektrometre tasarımı ile ilgili iken [2-4], diğer bir kısmı da spektrometrelerin çeşitli analizler için kullanımını ele almaktadır [5]. Bazı çalışmalarda ise belirli bir amaç için sensör ve alıcılar tasarlanmıştır [6]. Yee ve diğ. 1997 yılında yaptıkları çalışmada CCD görüntü alıcıları önüne mikro yapıda gratingler ekleyerek iki farklı mikro spektrometre tasarlamışlardır [2]. Hai Yang ve diğ. 2006 yılında yaptıkları çalışmada ışık kaynağı olarak LED ve sensör olarak fotodiyot IC'nin kullanıldığı bir RSS (Reconfigurable Sub-miniature Spectrometer) tasarımı ele almışlardır [3]. Flip Dominec 2010 yılında yapmış olduğu araştırma projesinde CCD alıcı bulunan düşük maliyetli taşınabilir bir spektrometre tasarımı ele almıştır [4]. Cambou ve diğ. 2015 yılında yaptıkları çalışmada toprak içerisinde organik karbon miktarının tespit edilmesine yönelik kızılötesi spektral ölçümler almışlardır [5]. Yin ve diğ. 2013 yılında yaptıkları çalışmada, toprağın nemini ölçmeye yarayacak bir sensör tasarımı ele almışlardır. Sensör için iki farklı dalga boyunda yayınım yapan led kullanılmıştır [6]. Yapılan

çalışmalar incelendiğinde hem kızılötesi spektrometrik yöntemlerin uygulandığı hem de bu yöntemlerin uygulanmasında kullanılacak spektrometre tasarımlarının ele alındığı görülmüştür. Bu çalışmada ise taşınabilir bir görünür yakın kızılötesi (Visible Near Infrared, Vis-NIR) spektrometre tasarımı amaçlanmış olup, NIR spektrometrelerin sıkça kullanıldığı tarımsal alanda toprak türünün spektral karakteristiklere göre sınıflandırılması konusu örnek uygulama olarak seçilmiştir. Toprak içerisindeki toplam organik karbon miktarı Vis-NIR bölgede görülen soğurma ile yüksek korelasyon göstermektedir. Bu bölgede ve özellikle 850-1100 nm aralığında C-H bağları soğurma karakteristiği göstermektedir. Bu bilgiler ışığında birbirinden farklı oranlarda ve türde organik ve inorganik bileşik içeren farklı toprak örneklerinin tasarlanan spektrometre ile sınıflandırılabilmesinin mümkün olduğunun bir örnek uygulama ile gösterilmesi amaçlanmıştır.

2. Spektrometrik Yöntemler ve Temel Bileşenler

Spektroskopik yöntemler, spektrometrik analizlerde uygulanan temel birkaç olaya dayanmaktadır. Soğurulma (absorption), saçılma (diffuse), emisyon bunlardan bazılarıdır. Tipik bir spektroskopik cihaz başlıca aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır[1].

- Işın enerjisi kararlı bir ışık kaynağı,
- Örneğin konduğu saydam bir hücre (numune kapları),
- Ölçümler için spektrumun belirli bölgesini ayıran bir düzenek (dalga boyu seçiciler),
- Işınlardan enerjisini ölçülebilir bir işarete dönüştüren bir dedektör.

Işık kaynağı çalışılan spektral aralığa göre değişmektedir. Benzer şekilde dedektör denilen, alıcı sensörlerin bulunduğu yapı da, çalışılan spektral aralığa göre değişebilir. Diğer birçok bileşen optik açıdan benzerlik göstermektedir [1]. Temel bileşenler şunlardır:

- Işık kaynakları,
- Numune kapları,
- Dalga boyu seçiciler,
- Dedektörler (algılayıcılar).

3. Spektral Verilerin Analizi

Spektrometrik yöntemlerle elde edilen spektral verilerin yorumlanması önemlidir. Bir örneğe ilişkin spektrumun ne tür bilgiler içerdiği kimya ve malzeme bilimlerinin yanı sıra veri madenciliği, örüntü tanıma ve makine öğrenmesi konuları ile ilintilidir. Sistemin, hangi spektral verinin hangi materyale ait olduğunu algılayabilmesi için bu uzaydaki her bir spektral verinin (bir örneği teşkil eden birden fazla spektral veri), sistemin işleyebileceği bir vektörel form ile temsil edilmesi gerekmektedir. Vektörel formların elde edilmesi ve herhangi bir spektral verinin hangi sınıfa ait olduğunun bulunabilmesi için bir takım dönüşüm işlemleri yapılmalıdır. Dönüşüm işlemleri sonucunda elde edilen vektörel formlar spektral verileri temsil eden öznitelikler olarak düşünülebilir [7].

Tüm bu süreçte öncelikli olarak, elde edilen spektral verilerin kaç sınıfa ayrılacağına belirlenmesi gerekir. Burada her sınıf

spektral verilerden faydalanılarak ayrıştırılmak istenen bir materyali (kimyasal bileşiği) ifade etmektedir.

3.1. Temel Kavramlar

Sınıflandırma: Bir veri yığını içerisinde alınan verilerin belirli özelliklerine (özniteliklerine) bakarak hangi sınıfa ait olduğunun belirlendiği yöntemlerin tümü biçiminde ifade edilebilir. Sınıflandırma işleminde sınıf sayısının ne kadar olacağı önceden sisteme bildirilebileceği gibi sınıf sayısını sistemin kendisinin belirlemesi istenebilir. Makine öğrenmesinde sınıflandırma yöntemleri denetimli ve denetimsiz olarak temelde ikiye ayrılır [7].

Denetimli öğrenme (supervised learning): Elde edilen verilerin hangi sınıfa ait olduğunun bilindiği ve verilerin buna göre sınıflandırıldığı öğrenme biçimidir. Öğrenmenin başarımı, elde edilen verilerin çokluğu ile doğru orantılıdır [7].

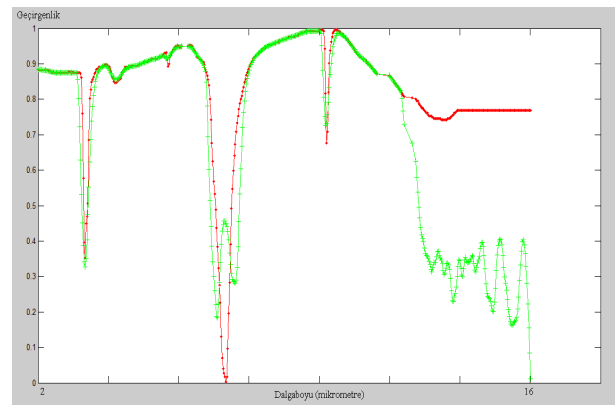
Denetimsiz öğrenme (unsupervised learning): Elde edilen veriler arasında herhangi bir sınıfa aidiyet bilgisinin bulunmadığı ve sınıf sayısının da sistem tarafından belirlenmesi gereken öğrenme biçimine denetimsiz öğrenme adı verilir [7].

3.2. Spektral Analizler

Örnek spektral analizler için NIST resmi internet sitesinden [8] spektral veri elde edilmiş ve MATLAB ortamına aktarılmıştır. Seçilen örnek toprak bileşikler;

- Amonyum nitrat,
- Sodyum nitrat,
- Potasyum nitrat

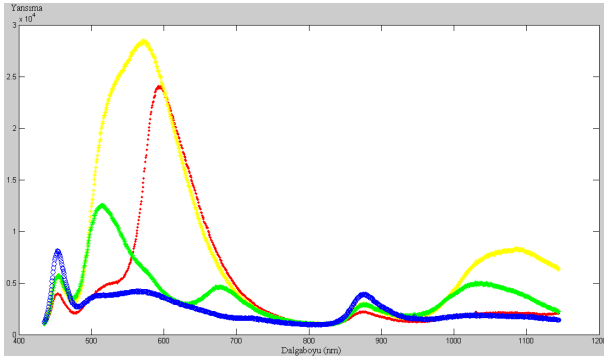
Her bir bileşenden rastlantısal örnekler oluşturabilmek için MATLAB ortamına aktarılan spektrumlar üzerinde değişiklikler yapılmıştır. Orijinal spektrumun soğurma bölgelerinde soğurma miktarları rastlantısal olarak değiştirilerek spektrumlar farklı örneklerden alınmış gibi simule edilmiştir. Her toprak bileşiği için 20 farklı rastlantısal örnek elde edilmiştir. Şekil 1’de orijinal spektrum ile beraber rastlantısal olarak elde edilen spektrumlar görülmektedir.



Şekil 1: Orijinal (kırmızı) ve rastgele elde edilen potasyum nitrat kızılötesi spektrumları (yeşil).

Türetilen rastlantısal spektrumlar ile LDA sınıflandırma algoritması kullanılarak LDA modeli elde edilmiştir. Modelin başarımını test etmek için yine rastlantısal spektrumlar kullanılmış ve model MATLAB kullanılarak doğrulanmıştır.

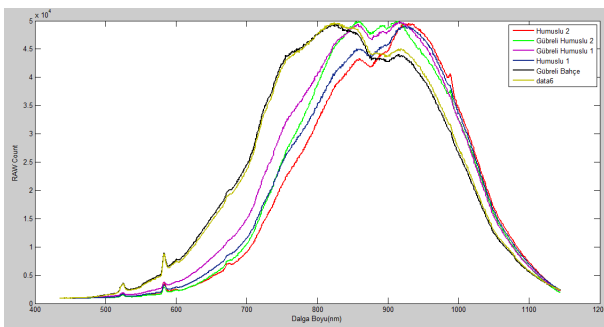
Benzer çalışma Hamamatsu mini spektrometre ile de yapılmıştır. Hamamatsu mini spektrometre ile ölçüm alabilmek için bir düzenek hazırlanmış ve renkli kartonlar, LDA yöntemi ile başarılı biçimde sınıflandırılmıştır. Aynı çalışma farklı bir düzenek ile toprak örnekleri üzerinde tekrar edilmiş LDA modeli MATLAB ile doğru sonuçlar vermiştir.



Şekil 2: Renkli kartonların spektrumları (Hamamatsu mini spektrometre)

Şekil 2’de renkli kartonlardan elde edilen spektrumlar görülmektedir. Elde edilen spektrumlar ve renkli kartonların bilinen spektral karakteristikleri ile spektrometrenin tutarlılığı incelenmiştir.

Şekil 3’te ise topraklardan elde edilen NIR spektrumlar görülmektedir. Her iki analizlerde de doğrulama yapılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Model elde etmek için her örnek türünden 100’er ölçüm alınmıştır. Renk analizleri için toplam 400, toprak analizleri için toplam 600 öğrenme verisi kullanılmıştır. Bu analizlerde her sınıftan 1’er örnek kullanılmış, ölçüm sayısı çoğullanmıştır.



Şekil 3: Toprak spektrumları (Hamamatsu mini spektrometre)

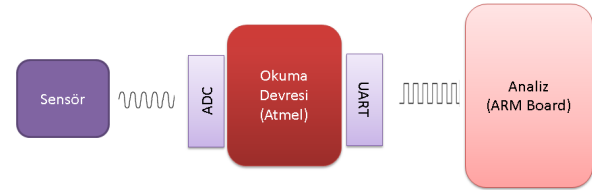
4. Spektrometre Tasarımı

Genel olarak birçok tarımsal uygulamada, özel olarak ise toprak sınıflandırılmasında kullanılacak olan NIR spektrometre tasarımı için Hamamatsu firmasının C11708MA mini spektrometre sensörü kullanılmıştır. Işık kaynağı olarak akkor lamba yeşil ve IR led birleşimi bir kaynak oluşturulmuştur. Kırmızı ve mavi ledler de ışık kaynağı olarak seçilmiş, fakat sensörün spektral aralığının (640 – 1100 nm) dışında kaldığı için tercih edilmemiştir.

NIR spektrometre için yansıtma tabanlı bir sistem ile ölçüm yapılabilir. Bu sistemde ışık kaynağından çıkan ışınlar örneğe çarptıktan sonra yansıyarak sensöre gelmektedir. Örneğin kimyasal yapısına bağlı olarak gönderilen ışığın bir kısmı soğurulacak, bir kısmı geçirilecek ve bir kısmı da yansıtılacaktır. Sensöre yansıtılan ışığın spektrumu, örneğin karakteristiği ile ilişkili olacaktır [1].

4.1. Donanım/Yazılım Tasarımı

Hamamatsu mini spektrometre sensöründen verileri alabilmek için okuma devresi ATMELE işlemci kullanılarak yapılmıştır. ATMELE yerine herhangi bir mikro denetleyici de kullanılabilir. Sensör’ün analog çıkışı ATMELE işlemcinin ADC girişine bağlanmıştır.



Şekil 4: Spektrometre blok tasarımı

Işık kaynağı olarak kullanılacak RGB ve IR led sürücü devresinde değişken dirençler kullanılarak ledlerin parlaklığı ayarlanabilir hale getirilmiştir. Bu sayede değişik akkor lamba ve led kombinasyonları için spektrumun ayarlanabilir olması sağlanmıştır.

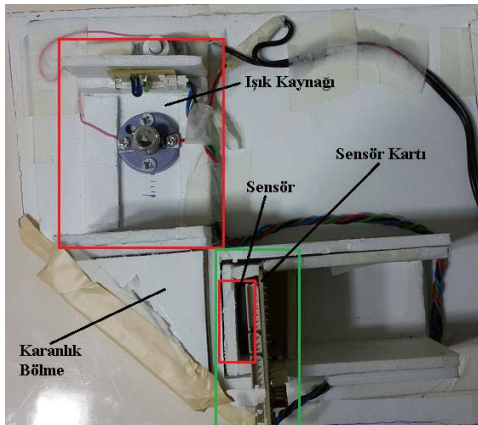
ATMELE okuma devresi ile ARM işlemcili analiz bloğu arasında UART haberleşmesi kullanılmıştır. UART haberleşmesi üzerine bir protokol tanımlanarak sensör okuma devresi ile hem PC hem de başka bir arayüzle istenildiği gibi haberleşilmesi sağlanmıştır. Şekil 5’te komut yapısı görülmektedir. Burada parametre H ve L değerleri, okunacak veri adedini göstermektedir. Opsiyonel parametre ise kaç sn’de bir veri alınacağını gösterir. Bu komutlar ile sensör devresi UART üzerinden kontrol edilebilmektedir. Bu sayede veriler hem PC üzerinden hem de STM3210E-Eval deneme kartı üzerinden okunabilecektir.

Komut yapısı					
Komut	Parametre H	Parametre L	İsteğe Bağlı Parametre	Checksum	
Örnek komutlar					
Komut	Parametre H	Parametre L	İsteğe Bağlı Parametre	Checksum	İşlem
1	0	100	1	153	1 saniye aralıklarla 100 örnek oku
2	0	1	0	253	1 nolu duruma geç

Şekil 5: Komut yapısı ve örnek komutlar

4.2. Yapısal ve Optik Tasarım

Spektrometre tasarımı öngörüldüğü biçimde maket kartonları ile yapısal olarak gerçekleştirilmiştir. Karanlık bölge için siyah bir karton malzeme kullanılarak içerideki yansımaların en aza indirilmesi sağlanmıştır. Akkor lamba için 4.8 V 0.5 A'lık ampul kullanılmıştır. Bu ampul yaklaşık 600-900 nm aralığında bir ışık spektrumu vermektedir. 900 nm üzeri için IR led kullanılmıştır. Ledlerin pozisyonu ile akkor lambanın pozisyonu örnek eksenine üzerine düşürülmüştür.



Şekil 6: Spektrometre bileşenleri (üst görünüm)

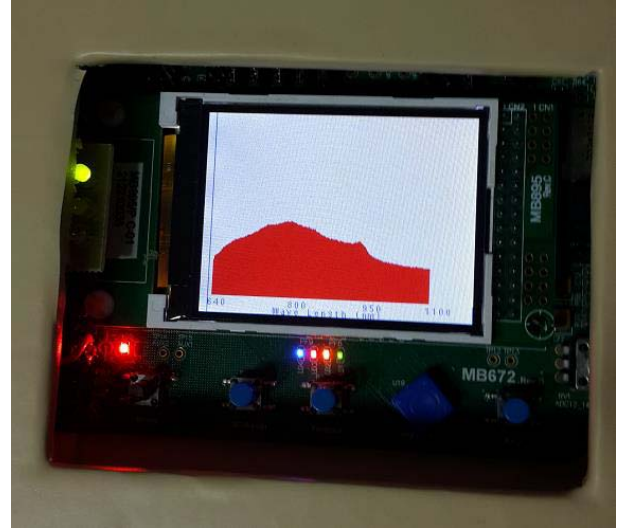
4.3. STM3210E-Eval Uygulaması

Sensör okuma devresinden elde edilen verilerin hangi sınıfa ait olduğunun belirlenebilmesi için bir öğrenme (machine learning) işlemi yapılmıştır. Bunun için de işlem kapasitesi 8 bitlik işlemciye göre daha yüksek ARM CORTEX – M0 bulunan STM3210E-Eval deneme kartı kullanılmıştır. Deneme kartı üzerinde spektrometrenin birkaç farklı modda çalışması sağlanmıştır. Deneme kartı üzerinde bulunan butonlar vasıtası ile kullanıcı bu modlar arasında geçiş yapabilmektedir.

4.4. Bilgisayar Uygulaması

Sensör sürücü devresinin UART üzerinden kontrol edilmesini sağlayan protokolü ile iki farklı bilgisayar uygulaması

geliştirilmiştir. İlk uygulama sensör ile haberleşerek gelen verileri grafik üzerinden göstermektedir. İkinci uygulama ise istenilen adette ölçüm alarak sınıflandırma işlemi için bir veri havuzu oluşturmakta ve LDA ile sınıflandırma işlemi yapılmaktadır.



Şekil 7: STM3210E-Eval deneme kiti üzerinde spektrometre modu görünümü

Uygulama .NET framework ile visual C# dili kullanılarak yazılmıştır. Accord.NET machine learning ve istatistik kütüphaneleri ile analiz işlemi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen projected mean ve özvektör matrisleri ile kalibrasyon değeri STM3210E-Eval kodunun içerisine bir matris olarak eklenmiştir.

4.5. Spektral Verilerin Sınıflandırılması

Ölçümler, tasarlanan spektrometrenin sensör kartının UART üzerinden PC'ye bağlanması ile elde edilmiştir. Veri toplamak için çalışma kapsamında hazırlanan bilgisayar uygulaması kullanılmıştır. Toplanan verilerle LDA modeli elde edilmiştir. Model sonrası özvektörler ve dönüştürülmüş sınıf ortalamaları kullanılmıştır. LDA çıktısı ve kalibrasyon değeri STM3210E-Eval deneme kartına aktarılmış sonrasında ise ölçülen yeni değerlerin yeni uzaya dönüştürülerek ortalamalara ne kadar uzaklıkta olduğuna bakılmıştır. Bunun için öklid uzaklığı baz alınmıştır.

Spektral ölçümler borosilikat cam kullanılarak yapılmıştır. Borosilikat deney tüpleri 300-2500 nm aralığında iyi bir geçirgenliğe sahiptir. İki farklı çiçek toprağına ait örnekler bu tüplere yerleştirilmiştir. Ağzıları streç film yardımı ile kapatılmıştır. Toprakların içerikleri bilinmemektedir. Her bir toprak sınıfından 30'ar örnek alınmıştır. Her sınıf için 20 adet öğrenme örneği 10 adet test örneği üzerlerine farklı etiketler yapıştırılarak ayrılmıştır. Şekil 8'de spektrometre düzeneği ve deney tüpünün yerleşimi görülmektedir.

Bu şekilde yapılan ölçümlerden sonra LDA modeli elde edilmiş ve model STM3210E-Eval deneme kartına aktarılmıştır. Test için her sınıftan kalan 10'ar adet toprak

örneği her sınıf için 5'er kez tekrarlı olmak üzere toplamda 100 adet kontrol testi yapılmıştır. Test yapılırken ölçülen spektral veri 20 boyuta indirgenmiş, PC'den aktarılan özvektörle yeni uzaya dönüştürülmüş, ortalamalara olan öklid uzaklıkları kıyaslanmıştır. Ölçülen örnek hangi sınıfa daha yakın ise o sınıfa aittir kararı verilmiştir. Her 10 ölçüm sonrasında, ışık şiddeti kalibrasyonu yapılarak 10'ar adet test grubu için toplam 100 ölçümde sonuç %100 olarak görülmüştür. Kalibrasyon yapılmadığı durumda bu oran düşmektedir.



Şekil 8: Spektrometre ve deney tüpü yerleşimi

5. Sonuçlar

Bu çalışmada kızılötesi spektroskopisinin temel ilkeleri ele alınmış, spektroskopik ölçüm yöntemleri incelenmiş, buna uygun optik, elektronik ve yapısal tasarım gerçekleştirilerek bir spektrometre tasarlanmıştır. Tasarlanan spektrometre ile örnek bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Uygulama için iki farklı tür çiçek toprağı LDA sınıflandırma algoritması ile başarılı bir biçimde sınıflandırılmıştır.

Sınıflandırmanın performansını artırmak için değişken sayısını azaltmak gerekmiştir. 640 – 1100 nm aralığı yaklaşık 20 nm aralıklara bölünerek boyut sayısı (değişken sayısı) 256'dan 20'ye indirilmiştir. Ayrıca sistemin dış ortamdan etkilenmemesi için örnek ile sensör arasına farklı kaynaklardan ışık gelmemesi sağlanmıştır. Bunu sağlamak için kaynak, sensör ve ölçüm alınacak örnek kabı ortak bir kapalı bölmeye bakacak biçimde tasarım yapılmıştır. Işık kaynağından çıkan ışınlar doğrudan örneğe çarpıp yansıma yapmaktadır. Yansıyan ışınların bir bölümü alıcı sensör dizisine gelmektedir. Gelen ışınlar dördüncü bölümün başında anlatılan C11708MA sensör tarafından algılanmakta ve okuma devresi sayesinde her dalga boyu için elde edilen analog işaret sayısal işarete dönüştürülmektedir. 10 bitlik ADC dönüşümü sonrası UART üzerinden veriler istenilen ortama aktarılabilir. Yapılan örnek uygulamada, veriler dördüncü bölümde tanıtılan PC yazılımına UART – RS232 yolu ile aktarılmıştır. Verilerin analizi sonucunda 20x20 özvektör matrisi elde edilmiştir. Sınıflayıcı (classifier) olarak öklid uzaklığı kullanılmıştır.

Tasarlanan spektrometre üzerindeki ışık kaynağı yerine dışarıdan farklı bir ışık kaynağı ve farklı bir ölçüm düzeneği

de kullanılabilir. Hamamatsu C11708MA sürücü kartı ile belirlenen protokol sayesinde herhangi bir platform ile de spektral ölçümler alınabilmektedir. Ayrıca tasarlanan spektrometre, taşınabilir bir düzenek üzerine yerleştirilerek arazi üzerinde analiz fonksiyonunu yerine getirebilir. Burada dikkat edilmesi gereken temel husus spektrometrenin ölçeceği örneğe gelen ışık şiddetinin öğrenme fazındaki ışık şiddeti ile aynı olması veya sürekli kalibrasyon yapılmasıdır. Ayrıca ölçüm sistemi optik olarak izole olmalıdır. Bu koşullar altında tasarlanan spektrometre zirai uygulamalarda yaygın olarak kullanılabilen bir araç haline getirilebilir. Uygulamanın başarısı sınıflandırma fazında kullanılan örneklerin iyi seçilmiş olmasına, optik izolasyona ve düzeneğin taşınabilir sisteme doğru bir biçimde eklenmesine bağlıdır.

6. Kaynaklar

- [1] [1] SKOOG, DOUGLAS A., HOLLER, F. J., CROUCH, S. R. (2007). Principles of Instrumental Analysis, 6th. Edition. Thomson Brooks/Cole.
- [2] YEE, M. G., MALUF, I. N., HING, A. P., ALBIN, M. ve KOVACS, T. A. G. (1997). Miniature spectrometers for biochemical analysis. *Sensors and Actuators*, A 58 (1997) 61-66.
- [3] YANG, H., WEI, X., LIANG, X., SU, M. ve LU, X. (2006). A SoC and LED based reconfigurable subminiature spectrometer for hand-held measurement applications, *Measurement*, 41 (2008) 44–54.
- [4] DOMINEC, F. (2010). *Design and construction of a digital CCD spectrometer*. (Araştırma Projesi). Czech Technical University in Prague Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering Department of Physical Electronics, 2010.
- [5] CAMBOU, A., REMI, C., KOUAKOUA, E., VILLENEUVE, M., DURAND, C. ve BARTHE, G. B. (2015). Prediction of soil organic carbon stock using visible and near infrared reflectance spectroscopy (VNIRS) in the field. *Geoderma*, 261 (2015) 151–159.
- [6] YIN, Z., LEI, T., YAB, Q., CHEN, Z. ve DONG, Y. (2013). A near-infrared reflectance sensor for soil surface moisture measurement. *Computers and Electronics in Agriculture*, 99 (2013) 101–107.
- [7] ALPAYDIN, E. (2010). Introduction to Machine Learning 2nd Edition. MIT Press Cambridge, 2010 MIT.
- [8] National Institute of Standards and Technology. Erişim : Şubat 2016, <http://www.nist.gov/>