METEOROLOJİ RADARI GÖRÜNTÜLERİNDEN ÜÇ-BOYUTLU GERİÇATIM VE GÖRSELLEŞTİRME

Mustafa PESEN¹, Uğur Murat LELOĞLU²

¹Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeodezi ve Coğrafi Bilgi Teknolojileri Anabilim Dalı, 06800, Çankaya, Ankara, e149618@metu.edu.tr

²Doç. Dr. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeodezi ve Coğrafi Bilgi Teknolojileri Anabilim Dalı, 06800, Çankaya, Ankara, leloglu@metu.edu.tr

ÖZET

Hava olaylarının izlenmesi ve tahmininde, uydular, meteoroloji istasyonları ve balonlar gibi çok sayıda algılayıcıdan faydalanılmaktadır. Meteoroloji radarları da aynı amaçla kullanılan önemli algılayıcılardır. Radarlar, etrafında onlarca kilometre ile ölçülen bir yarıçap içerisinde üç boyutlu olarak gerçek-zamanlı veri sağladıkları için kilit öneme sahiptirler. Radarlar çeşitli yükselme açılarında iki boyutlu görüntüler sağladıkları için bunların gözle yorumlanmaları güçtür. Bu çalışmada, iki boyutlu görüntüleri bir araya getirerek, radar tarafından tespit edilen yağmur, kar gibi sınıfları üç boyutlu kapalı hacimlere dönüştüren ve bunların üç boyutlu hareketli gösterimini yapabilen bir algoritma anlatılmaktadır.

Algoritma, NEXRAD Level III Doppler Meteoroloji Radar verilerini kullanmaktadır. Öncelikle iki boyutlu görüntülerde her bir yağış tipi için sürekli ve yavaş değişen yoğunluk kestirimi yapılmaktadır. Her pikselde azami yoğunluğa sahip yağış tipi o piksele atanmaktadır. Sonra görüntülerdeki yağış tiplerine bağlantılı bileşen analizi yapılarak bölütleme işlemi gerçekleştirilmekte ve her bölütün sınırları ile iki boyutlu kapalı bir poligon elde edilmektedir. Meta-veri kullanılarak bu poligonlar üç boyutlu hâle getirilmekte ve değişik yükselme açılarındaki poligonların aynı cisme ait olup olmadıklarına karar verilmektedir. Aynı cisme ait poligonların kenarları arasında eşleştirme yapılarak üç boyutlu örgü yapısı oluşturulmaktadır. Bu cisimler zaman boyutunda hareket ettirilerek meteorolojik olayların üç boyutlu görsel simülasyonu elde edilmektedir.

Anahtar Sözcükler: meteoroloji, üç-boyutlu modelleme, üç-boyutlu görselleştirme, dijital görüntü işleme, meteoroloji radarı

ABSTRACT

THREE-DIMENSIONAL RECONSTRUCTION AND VISUALIZATION OF WEATHER RADAR IMAGES

Numerous sensors, such as satellites, meteorological stations and balloons, are used to monitor and forecast weather events. Weather radars are also important sensors used for the same purpose. Radars are key instruments due to the fact that in a specific radius of tens of kilometers, they bring three-dimensional real-time data. Since radars provide two-dimensional images at various elevation angles, their visual interpretation is difficult. In this study, we describe an algorithm that combines two-dimensional images, transforms the classes detected by radar such as rain and snow into three-dimensional closed volumes and makes their three-dimensional simulations in time.

Algorithm uses NEXRAD (Next Generation Radar) Level III Doppler Meteorological Radar data. Firstly, continuous and smooth intensity estimates are obtained for each precipitation type in two-dimensional images. In every pixel, the precipitation type with the maximum density is assigned to that pixel. Then, the precipitation type image is segmented by performing connected component analysis and a closed two-dimensional polygon is obtained from the boundaries of each segment. By using meta-data, these polygons are transferred to three-dimensional space and it is decided whether the polygons in different elevations belong to the same object. A three-dimensional mesh structure is created by matching the vertices of the polygons of the same object. These structures are displayed sequentially to create three-dimensional visual animation.

Keywords: meteorology, three-dimensional modeling, three-dimensional visualization, digital image processing, weather radar, hydrometeor classification

1. GİRİŞ

Hava olaylarının izlenmesi ve tahmininde, uydular, meteoroloji istasyonları ve balonlar gibi çok sayıda algılayıcıdan faydalanılmaktadır. Meteoroloji radarları da aynı amaçla kullanılan önemli algılayıcılardır. Radarlar, etrafında onlarca kilometre ile ölçülen bir yarıçap içerisinde üç boyutlu olarak gerçek-zamanlı veri sağladıkları için kilit öneme sahiptirler.

Radar görüntüleri tipik olarak her yükselme açısı için iki boyutlu görüntüler olarak verilir. Ancak, bu gösterim verilerin üç boyutlu olarak zihinde canlandırılmasını ve yorumlanmasını zorlaştırmaktadır. Çalışmamızda, meteoroloji radarında sınıflandırılmış, yağmur, kar vb. sınıfların her biri, üç boyutlu bir hacim olarak geriçatılmakta

ve üçgenlerden oluşan üç boyutlu geometrik yapılar olarak görselleştirilmektedir. Böylece, ayrıntılı topoğrafyayı, değişken ve dinamik atmosfer yapısını ve birçok atmosfer katmanının yoğunluklarını zamanın fonksiyonu olarak gözlemleme fırsatı sunmaktadır. Sisteme girdi olarak aldığımız radar verisi “Multiparameter Radar” olarak geçen NEXRAD Level III verisidir. Bu sistem yüksek çözünürlük ve yüksek keskinlikte veriler üretmekle kalmayıp, yağışın mikro fiziksel özelliklerini oldukça iyi bir şekilde sergilemektedir.

Bu bildiri şu şekilde organize edilmiştir: İkinci bölümde kullanılan meteoroloji görüntülerinin özellikleri açıklanmıştır. Üçüncü bölümde geriçatma algoritmamız ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Dördüncü bölümde elde ettiğimiz bulgular verilmiş ve son bölümde ise sonuçlar tartışılmıştır.

2. METEOROLOJİ RADARI GÖRÜNTÜLERİ

NEXRAD Level III Doppler Meteoroloji Radarları, programlanmış bir şekilde bir dizi hareket düzeni içerisinde 360° ’lik azimut ve 0.5° ’den 3.4° ’ye kadar yükselme (elevation) aralığında tarama yeteneğine sahiptir. Level III radar Azimutta $1 \text{ km} \times 1^\circ$ çözünürlüğe sahip olup Hacimsel Kapsama Örüntüsü (Volume Coverage Pattern, VCP) Şekil 1’de gösterilmiştir.

Şekil 1. NEXRAD Doppler Radar Verisi Üç-Boyutlu Hacimsel Kapsama Örüntüsü (Ru 2007).

Radardlar ciddi hava olayları yaşanması sırasında dönüş hızlarını arttırıp bu sayede daha seri veri aktarabilir. Temiz havalarda ise yavaşlayarak daha az tarama yapabilecek şekilde programlanmışlardır. Bu tarama sırasında elektromanyetik dalgalar atmosfere gönderilir ve atmosferdeki saçıcı nesnelerden geri alınan sinyaller (eko) ölçülür. Bu sayede katmanlardan yansıyan sinyaller Damla Büyüklüğü Dağılımı (Drop Size Distribution) oranı sayesinde yağış kategorilerini belirler ve söz konusu kümelenmeler ile hava hadiselerinin konumu ve şiddeti hesaplanır. Bu veriler piksel koordinatlarına aktarılır ve ara değerlendirme yapılarak hava olaylarına ait coğrafi koordinatlar verinin içerisinde yerleştirilir. Görüntü içerisinde şu sınıflar bulunmaktadır:

- Eşik değeri altında kalanlar
- Biyolojik yansımalar
- Yer yansıması
- Buz kristal
- Kuru kar
- Islak kar
- Az ve orta yağış
- Yoğun yağış
- Büyük damla yağış
- Grezil (graupel)
- Dolu(muhtemelen yağmur ile)
- Tanımlanamayanlar
- Bilinmeyen sınıflar
- Sınır aşımı

3. GERİÇATMA ALGORİTMASI

Geliştirdiğimiz algoritma Şekil 2’de akış şeması olarak gösterilmiştir. Algoritma Seviye III görüntülerini ve görüntülere ait meta-verileri kullanarak, çeşitli aşamalardan sonra üç boyutlu grafik nesneler oluşturmaktadır. Algoritmanın aşamaları aşağıdaki alt-bölümlerle ayrıntıları ile anlatılmıştır.

Şekil 2. Akış Şeması.

3.1. Yoğunluk Hesaplama

Orijinal veride bazı piksellerde tanımlı bir sınıfın kodu bulunurken bazı pikseller etiketlenmemiştir. Öncelikle, her bir yağış türünün yoğunluğunu her bir piksel için ve sürekli bir fonksiyon olarak kestirmek gereklidir. Bunun için, her pikseldeki yağış türü değeri, belirli bir komşulukta söz konusu yağış türü içeren piksellerin sayısı olarak kestirilmiştir. Doğal olarak, kullanılan komşuluk penceresinin büyüklüğü ile normalize edilmiştir.

Uygulama kolaylığı açısından kare şeklinde filtre seçilmiştir. Filtrenin büyüklüğü arttıkça, elde edilen yoğunluk fonksiyonunun düzgünlüğü artmaktadır. Bu nedenle, pencerenin büyüklüğü ile elde edilecek nihai şekillerin yüzey düzgünlüğünü kontrol etmek mümkündür.

3.2. Görüntü Bölütleme

Bilgisayar görüşü bağlamında görüntü bölütleme, veri üzerinde bir dizi benzerliği temel alarak, görüntünün kendi içerisinde birbirine bağlı ve tekdüze parçalara ayrıştırılma işlemidir. Öncelikle yoğunluk haritaları karşılaştırılarak, her pikselde azami yoğunluğa sahip olan sınıf o piksele atanır. Tüm yağış sınıfları içerisinde, hepsi belirli bir yoğunluğun altında ise o piksele herhangi bir atama yapılmaz. Bu sayede, radar verisinde istenilmeyen, biyolojik nesneler, yerden yansıyan ekolar, anlamlandırılmayan sınıflar, radar menziline aşan veya eşik değerinin altında kalan noktalar da elimine edilmektedir.

Ardından, görüntüye bağlantılı bileşen analizi yapılır. Böylece her görüntüde yağış sınıflarına ait bölütler oluşturulur.

3.3. Çevre Poligonlarının Çıkarılması

Görüntü bölütme işlemi sonrasında elde edilen bölütün sınırları öncelikle bir sınır izleme algoritmasına kullanılarak iki boyutlu bir kapalı poligona çevrilir. Literatürde bulunan yöntemler (pixelfollowingmethod, vertexfollowingmethod, Simple boundaryfollower vb.) incelenerek benzer bir algoritma uygulanmıştır (Jonghoon, vd. 2016). Bir piksele ait sekiz komşu kullanılarak poligonlar oluşturulmuştur. Meta-veri içerisinde her pikselin enlem ve boylam bilgileri bulunmaktadır. Pikselin yüksekliği ise radarın konumu, yükselme açısı ve radara olan uzaklık kullanılarak hesaplanabilmektedir. Sınırı oluşturan her pikselin üç boyutlu koordinatları hesaplanarak poligonlar üç-boyutlu hâle getirilir. Bu aşamada, poligonlar yağış tipine göre renklendirilerek “kml” olarak ihraç edilir. Böylece, poligonlar Google Earth benzeri bir programda üç boyutlu olarak incelenebilmektedir.

3.4. Poligonların Birleştirilmesi

Bu basamakta artık algoritma farklı yükselti açılarındaki dilimleri karşılaştırmaya başlar. Burada amaç, değişik yüksekliklerde bulunan aynı yağış tipine ait poligonların aynı kütenin devamı olup olmadığına karar vermektir. Çevre poligonları çıkartılmış bölütler iki boyutlu olarak üst üste getirilerek birleştirme işlemi yapılmaktadır. Algoritma bu süreçte sadece aynı etikete sahip poligonları işler.

Algoritma görüntü işlerken öncelikle ardışık yükselme açılarına ait görüntüleri kullanır. Yani, küçük açılı olan görüntü ile (alt görüntü) bir büyük açılı olan (üst) görüntü karşılaştırılır. Öncelikle, her iki görüntüdeki bütün poligonların ağırlık merkezi koordinatları belirlenir. Alttaki görüntüde belirli bir yağış tipine ait poligonların merkez noktaları ile bir üst görüntüdeki aynı yağış tipine ait olan poligonları karşılaştırılır. Bunu gerçekleştirirken, üstteki poligonların her birinin alttaki bütün poligonlara planimetride Öklid mesafesi hesaplanır. Aralarında en kısa mesafe olanlardan başlanarak eşleme yapılır. Bu sayede, üstte yer alan görüntü içerisinde aynı yağış tipine sahip olan poligonlar bir alttaki görüntüdeki poligonlarla eşleşmiş olmaktadır.

Ancak, birbirlerinin devamı olan poligonlar için en uzak eşik değerleri belirlenmiştir. Yani, eğer poligonlardan birinde hesaplanan en kısa mesafe eşik değerinden büyükse herhangi bir atama yapılmaz.

Algoritmanın son basamağında ise farklı yükselme açılarındaki bulunan aynı sınıfa ait eşleştirilen küme sınırları aynı şekilde üst üste birleştirilmiştir.

3.5. Radar Verilerinin Üç Boyutta Görselleştirilmesi

Seçimi yapılan radarın konumu ve saatine göre temiz hava veya yağışlı hava olmak üzere iki tip Radar Hacimsel Kapsama Örüntüsü tipi olduğundan bahsetmiştik. Bu tiplere bağlı olarak yükselmede radarın tarama seviye sayısı ve tarama hızları da değişmektedir. Dolayısıyla yağışlı havada radarın dönüş hızı artarak, kısa zamanda daha fazla tarama yapabilmektedir. Bu sayede hidrometeor sınıflandırılması için gerekli aynı zamana ait azami altı adet görüntü elde edilmiş olmaktadır. Bu noktada amaç, aynı yağış tipine ait değişik yükselme açılarındaki üç boyutlu iki poligonun kenarları arasında bir eşleme yapmaktır.

Görüntüler ardışık olarak eşlendikten sonra, bir zincir oluşturan poligonlar bir araya getirilerek aşağıdan yukarıya tüm şekil oluşturulmaktadır. Eğer, arada bir görüntüde parçası eksik olan bir şekil varsa, bunlar iki ayrı şekil olarak değerlendirilmektedir.

Algoritma sonucunda eşleşen poligonlar saptandıktan sonra, her iki poligonda x ekseninde maksimum değere, y ekseninde ise minimum değere sahip olan kenar noktaları belirlenir. Bu nokta, poligonlar için bir mihenk taşı durumunda olmaktadır. Söz konusu noktadan itibaren saat yönünün tersi istikamette poligonlar arasında üçgenler oluşturulmaya başlanır. Daha sonra bu üçgenler üç boyutta birer dış yüzey oluşturmaya başlayacaktır. Üçgenlerden oluşan yüzeyler, renklendirilir, saydamlık ölçütleri atanır, kesişen noktalar üzerinde renk geçişlerinin olup olmayacağı belirlenir, gelecek ışığın açısı ve cinsi belirtilir ve bilgisayar grafik teknikleri kullanılarak görselleştirilir.

4. BULGULAR

Şekil 3a'da Columbus AFB, Mississippi de konumlandırılmış NEXRAD doppler radar istasyonuna ait, 19/Ocak/2017 tarihli, 0.5° yükselme açısına sahip, 13:51 saatinde kaydedilmiş tipik bir hidrometeor sınıf görüntüsü vardır.

İlgili veriyi ham veri olarak kabul ederek örüntü üzerinden yoğunluk hesaplaması yapılmıştır. 15 piksel yarıçap değerine sahip olan kayan pencere ile 12 farklı yağış sınıfına sahip $M*N*12$ 'lik bir görüntü elde edilmiştir. Bu görüntüden örnek olarak dört adet yağış sınıfı seçilerek Şekil 3c, d, e ve f'ye yerleştirilmiştir. Şekil 3b'de yer alan görüntü için yapılan bir sonraki işlemde ise daha önceden belirlenmiş olan %10'luk eşik değerine göre $(31*31*0.1)$ belirli sayıyı sağlamış veya daha fazla değere sahip pikseller etiketli oldukları yağış tipine ait olan etiket numarasıyla ve daha önceden belirlenmiş olan ilgili etiketin rengiyle yeni görüntüye geçmişlerdir. Dolayısıyla gri-skala görüntü renkli görüntüye çevrilmiştir.

Şekil 4b’de ise Seattle, Washington’da konumlandırılmış NEXRAD doppler radar istasyonuna ait, 9/Mayıs/2018 tarihli, 0.9° yükselme açısına sahip, 00:09 saatinde kaydedilmiş başka bir hidrometeor sınıf görüntüsü vardır. Şekil 4a’da yer alan iki görüntüde eşik değeri oranı %10 gibi küçük bir değer tutularak düşük yoğunluğa sahip piksellerinde görüntü içerisinde yer alması sağlanmıştır. Şekil 4a ve c’de yer alan görüntülerde aynı etikete ait yağış tiplerinin büyüklükleri ve yakınlıkları (sıklıkları) üzerindeki farklılığın sebebi şudur: Şekil 4a, Yukarıdaki örnekte

Şekil 3. a) NEXRAD Hidrometeorlara ait sınıflandırma, ham veri b) Görüntü bölütme sonucu c) Sadece kuru kar sınıfına ait görüntü d) Sadece az ve orta yağış sınıfına ait görüntü e) Sadece Grezil sınıfına ait görüntü f) Ham veri içerisinde sınıfları tayin edilememiş piksellere ait görüntü.

yarıçap iki piksel olarak alındığı için minimum ($5*5*0.1$) ve maksimum ($5*5*1.0$) değerleri arasında kalan piksel değerleri görüntüye atanmıştır. Alttaki görüntüde ise minimum ($31*31*0.1$) ve maksimum ($31*31*1.0$) değerine sahip pikseller arasından değeri en yüksek olan yağış tipine ait pikseller atanmıştır. Şekil 4c’de ise bu sefer eşik değeri %90 seviyesine çekilmiştir. Bu sayede yukarıdaki görüntüde sadece minimum $5*5*0.9$ ve maksimum $5*5*1$ değeri arasında olan pikseller alınırken diğer pikseller eşik değeri altında kaldıklarından dolayı istenilen yoğunluk ayarlanmaktadır. Altaki örnekte ise yarıçap oldukça büyüdüğü için $31*31*0.9$ değerine varana kadar bir çok piksel değeri eşik altında kalmış ve sadece çok yüksek yoğunluğa sahip etiketler geriye kalmıştır.

Şekil 4. a) Yukarıda ve aşağıda %10 eşik değerine sahip 2piksel ve 15piksel yarıçapa göre yoğunluk farkı
b)Yukarıda ham veri, aşağıda etiketlerine göre yağış tipleri c) Yukarıda ve aşağıda %90 eşik değerine sahip
2piksel ve 15piksel yarıçapa göre yoğunluk farkı.

Birçok görüntü üzerinden denemeler yaptığımız için algoritmanın üç boyutlu modellenmesi sırasında yağış tiplerinin birbirlerine göre kestirimlerinin ve değişimlerinin en iyi gözlemlenebildiği değer olarak yarıçapı 15piksel, eşik değerini ise %10 olarak belirlenmiştir. Burada önemli olan ham veri içerisinde sürekliliğe sahip, görüntü üzerinde baskın yağış tipi olarak kendini belli eden etiketi ve söz konusu etiketlerin konumu en önemlisi sınırlarını doğru kestirebilmektir. Radar sahası içerisinde istenmeyen, yani yağış tahmini yapabilmek adına gerek duymadığımız etiketlerden kurtulmak da önem arz etmektedir. Örnek verecek olursak, üç boyutlu bir modelleme içerisinde radarın maksimum uzaklığını belli eden ‘Sınır Aşımı (RF-RangeFolded)’ etiketini algoritmaya girdi olarak vermemiz durumunda bulut gibi algılanarak modellenen ve gerçekten gözlemlenmesi gereken yağış tiplerini görselleştirme içerisinde gölgeleyecektir. Bu yüzden 15piksel ideal bulunmuştur. %10’luk eşik değeri ise arta kalan boşlukları ilgili etiketle doldurmak için minimize edilmiştir.

Algoritmanın işleyişinin devamı olması niteliğiyle Şekil 4’te kullanılan 0.9° yükselim açısına sahip görüntü üzerinde yapılan işlemlerin tamamı aynı şekilde 0.5°, 1.5°, 2.4°, ve 3.4°’lik yükselim açısına sahip beş görüntüde de uygulanmış ve Şekil 5a’da sırasıyla gösterilmektedir. Daha sonra Şekil 5b’deki en üst görüntüde çevre poligonları çıkartılan görüntüler hesaplanan enlem ve boylam değerleri yanısıra yükselti değeri ile üst üste dizilerek “kml” (KeyholeMarkup Language) formatına ihraç edilerek Google Earth’te gösterilmiştir. Aynı yağış tipine ait yükselmede ardışık eşleşen poligonlar birleştirilmiştir. Ortada yer alan görüntüde sadece “Kuru Buz” sınıfına ait örüntülerin modellenmesi esnasında dört farklı bulut yapısı ortaya çıkmıştır. En altta ise sadece “Az ve Orta Yağış” sınıfına ait örüntülerin modellenmesi sırasında ise 0.5° yükselmeden itibaren gözlemlenebilen yağış tipi en üst 3.4° yükselmede de gözlemlenmiş ve son görüntüden algılanabileceği üzere büyük bir bulut örüntüsü oluşturmuştur. Bunun yanı sıra iki küçük yağış bırakan bulut da görselleştirmede gözlemlenebilmektedir.

Bu çalışmamızda en önemli elde edilen bulgulardan bir tanesi de yağış bırakan bulutların konumlarının çok daha net kestirilebiliyor olmasıdır. Genellikle rastlanan bir bölgeye yağış bırakan bulutların belirli bir kısa mesafe sonrasında hiç yağış bırakmamış olması gibi durumlar tarafımızca daha keskin sonuçlarla tahmin edilebilecektir. Ayrıca yağış tiplerinin birbirlerine olan uzaklıkları, hacimsel ve kütsel olarak dönüşümleri ve birbirleriyle olan etkileşimleri çok net bir şekilde gözlemlenebilmektedir.

Şekil 6a'da ise eşleşen iki poligonun birleştirilmesi sırasında oluşturulan üçgenlerin sergilendiği algoritma daha ayrıntılı olarak gözlemlenmektedir. Daha sonra aynı algoritma ile yükselmede eşleşen aynı sınıfa ait poligonlar bir

Şekil 5. a) Radar hydrometeor kümesi b) Kayan pencere tekniği ile örüntü hesaplanması (1) 3B Kuru Buz modeli (2) 3B Az ve Orta Kademeli Yağış modeli (3).

döngü ile birleştirilmiştir. Son olarak dış yüzey için renk belirlenmiş, ışık ve konumu ayarlanmış ve renk geçişleri uygulanmıştır.

Şekil 6.a) Yükselmede ardı ardına eşleşen iki poligonun birleştirilmesi b) Aynı sınıfa ait poligonların birleştirilmesi.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, meteoroloji radarlarının çeşitli yükselme açılarındaki görüntülerini birleştirerek üç boyutlu yağış kütleleri oluşturan ve bunları zaman ekseninde simüle eden bir algoritma anlatılmıştır. Geliştirilen algoritma, radar görüntülerinin gözle yorumlanması aşamasında kullanıcılara kolaylık sağlayacaktır. Algoritma başarı ile çalışmakta ise de karmaşık şekillere sahip yapılar zaman zaman yanlış şekiller oluşmasına neden olmaktadır. İleride, algoritma çok karmaşık şekilleri de kolayca geriçatacak şekilde geliştirilecektir. Kullanıcı arayüzü daha işlevsel hale getirilecektir. Ayrıca, birden fazla radarın görüntülerini aynı anda birleştirerek daha gerçekçi üç boyutlu şekiller oluşturulacaktır.

KAYNAKLAR

Boiangiu, C. A. ve Ioanitescu, R. (2013). *Voting-based Image Segmentation*. Journal of Information Systems & Operations Management, 1-15.

Harper, C., 2008. *Weather by the Numbers: The Genesis of Modern Meteorology*. 2. basım, The MIT Press Cambridge, Massachusetts, London, England. 308 sayfa.

Jonghoon S., Seungho C., Jinwook S., Dongchul K., Cheolho C., ve Track-Don H., 2016. *Fast Contour-Tracing Algorithm Based on a Pixel-Following Method for Image Sensors*. Sensors (MDPI)

Jolliffe, I. T. ve Stephenson, B. D., 2012. *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*. 2. basım, Wiley-Blackwell A John Wiley & Sons, Ltd, Publication, 274 sayfa.

National Research Council, 2002. *Weather Radar Technology Beyond NEXRAD*. National Academy Press, Washington, D.C., 98 sayfa.

Ru, Y., 2007. *Volumetric Visualization of NEXRAD Level II Doppler Weather Data From Multiple Sites*. In *Partial Fulfillment of the Degree of Master of Science*, Purdue University, Indiana, 71 sayfa.