UZAKTAN ALGILANMIŞ GÖRÜNTÜLERİN EĞİTİMSİZ SINIFLANDIRILMASINDA OPTİMAL BÖLÜT SAYISININ BELİRLENMESİ

M.C. Şahingil[1], Y. Özkazanç[2]
[1] TÜBİTAK – UEKAE / İLTAREN, Ümitköy, Ankara. mehmets@iltaren.tubitak.gov.tr
[2]Hacettepe Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Beytepe, Ankara. yakup@ee.hacettepe.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma, uzaktan algılanmış imgelerde optimal bölüt sayısının belirlenmesi için bölütleme geçerliliği indislerinden (bölütleme kalitesi metrikleri) yararlanma konusunu etüt etmektedir. Bu etüd kuzey Amerika'da yer alan bazı kentsel yerleşim alanlarının LANDSAT görüntüleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir görüntü, standart bölütleme algoritmaları kullanılarak sırası ile 2'den 20'ye kadar bölütlenmiş ve her bir bölütleme için bölütleme geçerliliği indisleri hesaplanmıştır. Bölütleme geçerliliği indislerinin ekstremum değer aldığı bölüt sayıları bulunarak optimal bölütleme sayıları hesaplanmıştır. Her bir kentsel yerleşim bölgesi için belirlenen optimal bölüt sayılarının dağılımına bakılmış ve Kuzey Amerika'da yer alan kentsel yerleşim bölgeleri için optimal bölüt sayısının 4 olduğu tespit edilmiştir. Önerilen optimal bölüt sayısı belirleme yöntemi bir grup imge için uygulanabildiği gibi tek bir imgedeki optimal bölüt sayısını belirlemek için de kullanılabilir.

Anahtar Sözcükler: Uzaktan Algılama, Arazi Örtüsü Sınıflandırması, Eğitimsiz Sınıflandırma, Bölütleme, Bölütleme Geçerlilik İndisleri.

DETERMINATION OF OPTIMUM CLUSTER NUMBER IN UNSUPERVISED CLASSSIFICATION OF REMOTELY SENSED IMAGES

ABSTRACT

This paper examines the use of cluster validity indices as a way of determining the optimum cluster number in remotely sensed images. This study is based upon by LANDSAT images of some of the larger cities in Northern America. Each image is clustered into 2 to 20 clusters via standart clustering algorithms and for each clustering cluster validation indices are calculated. Then, the cluster count at which the cluster validation index takes extremum values are determined and taken as the the optimum cluster count. The statistical distribution of the optimum cluster counts are investigated and the optimum cluster count for the large cities in Northern America is found as 4. This methodolgy for determining optimal cluster number is not only applicable to a group of images but can also be used for a single remotely sensed image.

Keywords: Remote Sensing, Landcover Classification, Unsupervised Classification, Clustering, Cluster Validity Indices.

1. GİRİŞ

Günümüzde uzaktan algılanmış verilerin kıymetlendirilmesinde kullanılan temel yaklaşımlardan biri de sınıflandırma yaklaşımlarıdır. Sınıflandırma yöntemleri eğitimli sınıflandırma ve eğitimsiz sınıflandırma olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Eğitimsiz sınıflandırmanın (bölütleme) eğitimli sınıflandırmadan en büyük farkı, incelenen bölge ile ilgili bir ön bilgiye ihtiyaç duymamasıdır.

Eğitimsiz sınıflandırmada kullanılan bölütleme yöntemlerinde görülen en temel problemlerden biri, incelenen bölge hakkında ön bilgiye sahip olunmadığı durumlarda, incelenen imgenin kaç bölüte ayrılacağı konusunda net bir dayanak olmamasıdır. Bu tür durumlarda bölüt sayısı genellikle kullanıcı tarafından, nesnel bir kritere başvurmaksızın, belirlenmektedir.

Öte yandan, literatürde, kullanılmakta olan eğitimsiz sınıflandırma yöntemlerinin doğruluğunun/yerindeliğinin kestirilebilmesine olanak tanıyan bazı ölçütler bulunmaktadır. Bölütleme Geçerliliği İndisleri (Cluster Validity Indices) veya Bölütleme Kalitesi Metrikleri olarak adlandırılan bu ölçütler aynı imge üzerinde yapılmış iki farklı bölütlemenin geçerliliğini karşılaştırmamıza olanak tanımaktadırlar. Bu göstergeler aynı veri seti üzerinde herhangi iki alternatif bölütlemeyi kıyaslamak için kullanılabilecekleri için, bu göstergeler kullanılarak optimal bölüt sayısını belirlemek de mümkündür. Bu çalışma, bu fikir üzerine inşa edilmiştir.

Bu bildiri şu şekilde yapılandırılmıştır. 2. bölümde bölütleme geçerlilik indisleri ve eğitimsiz sınıflandırmada bu indislerin rolü incelenmiştir. 3. bölümde bölütleme geçerlilik indisleri kullanılarak optimal bölüt sayısının belirlenmesi için önerilen yöntem detaylandırılmıştır. 4. bölümde, sunulan yöntemin Kuzey Amerika'da yer alan bazı kentsel yerleşim bölgelerinin LANDSAT görüntüleri

üzerinde uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar incelenmiştir. 5. bölümde ise genel bir değerlendirme yer almaktadır.

2. BÖLÜTLEME GEÇERLİLİĞİ

Bölütleme veya eğitimsiz sınıflandırma işlemi yapılırken, incelenen bölgeyle ilgili bir ön bilgi bulunmadığından, bölütlemenin kalitesini ölçmek için izlenebilecek en doğru yol incelenen bölgenin yer gerçekleri (ground truth) verisiyle bölütleme sonucunun karşılaştırılmasıdır. Fakat, her uygulamada ilgili bölgenin yer gerçekleri verisine ulaşmak mümkün olmayabilir.

Yer gerçekleri verisine ulaşılamadığı durumda izlenebilecek alternatif bir yöntem; bölütlerin kendi içerisindeki ve diğer bölütlerle olan piksel bazlı ilişkisine bağlı olarak çıkarılabilecek görece (relative) bölütleme geçerliliği indisleridir. Bölütlerin birbirinden tutarlı bir şekilde ayrılması genel itibariyle bölütlerin kendi içerisinde kompakt bir yapıya sahip olup, diğer bölütlerle aralarındaki uzaklığın büyük olmasına bağlıdır. Literatürde kullanılan bölütleme geçerliliği indisleri [1,2] bu iki kritere göre çeşitli değerler alıp incelenen imgenin bölütlenme kalitesini göstermektedirler. Bazı geçerlilik indisleri incelenen imgenin bölütlemesinin iyi olduğu durumlarda yüksek değerler alırken, bölütlemenin kötü olduğu durumda düşük değerler alırlar. Bazı diğer indisler için ise bu durumun tersi geçerlidir. Dolayısıyla bazı indisler bölütlenmenin iyi olduğu durumlarda yüksek değerler alırken, bölütlenmenin kötü olduğu durumda düşük değerler alır. Her iki durumda da, bölütleme kalitesini eniyilemek bir geçerlilik indisinin belirli bir ekstremumunu bulmaya indirgenmektedir.

Literatürde, bölütlendirilmiş bir veri setinin bölütlerinin ne kadar iyi ayrıldığını ölçmek için tanımlanmış çeşitli metrikler bulunmaktadır. Takip eden alt ayrımlarda, literatürde sıkça kullanılan üç farklı bölütleme geçerliliği indisi detaylandırılmıştır.

2.1. Davies-Bouldin İndisi

Davies-Bouldin indisi (Xu and Wunsch, 2009), tüm imgenin incelenip, bölütleme kalitesi hakkında tek bir değer verilmesini sağlayan bir yöntemdir. Yöntemin formülize edilmiş şekli, (1) denkleminde gösterilmiştir.

$$DB = \frac{1}{n} \sum_{i=1, i \neq j}^{n} \max\left(\frac{\sigma_i + \sigma_j}{d(c_i, c_j)} \right) \tag{1}$$

(1) denkleminde n, bölüt sayısını; σ_i, i bölütündeki bütün elemanların bölüt merkezine, c_i, olan ortalama uzaklığını; σ_j, j bölütündeki bütün elemanların bölüt merkezine, c_j, olan ortalama uzaklığını ve $d(c_i, c_j)$ ise bölüt merkezleri arasındaki uzaklığı göstermektedir.

Davies-Bouldin indisinin küçük olması, bölütlerin kendi içerisinde yoğun bir yapıya sahip olup, diğer bölütlerden uzak olduğunu gösterir. Dolayısıyla Davies-Bouldin indisinin minimize edilmesi, bölütleme işleminin daha tutarlı bir biçimde yapıldığını gösterir.

2.2. Dunn İndisi

Dunn indisi (Dunn, 1974), incelenen imgedeki tüm piksellerin incelenip, bölütleme kalitesi hakkında tek bir değer verilmesini sağlayan bir yöntemdir. Yöntemin formülize edilmiş şekli, (2) denkleminde gösterilmiştir.

$$D = \frac{d_{\min}}{d_{\max}} \tag{2}$$

Bu denklemde $d_{\min}$, farklı bölütlere ait iki eleman arasındaki en kısa uzaklık değerini; $d_{\max}$ ise, aynı bölüte ait iki eleman arasındaki en büyük uzaklık değerini göstermektedir.

Dunn indisi $[0, \infty]$ aralığında değerler alır. Bölütlerin birbirinden uzaklığının bir ölçütü olan $d_{\min}$ değerinin büyük olması ve bölütlerin kompaktlığının bir ölçütü olan $d_{\max}$ değerinin küçük olması,

bölütlemenin kaliteli olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla Dunn indisinin maksimize edilmesi, bölütleme işleminin daha tutarlı yapıldığını gösterir.

2.3. Siluet İndisi

Siluet indisi (Silhouette Index) (Rousseeuw, 1987), bölüt bazlı çalışan diğer bölütleme geçerliliği indislerinden farklı olarak her bir elemanın uygun bölüte ait olup olmadığını inceler. Dolayısıyla incelenen imgedeki her piksel için ayrı bir değere sahip olur. Siluet indisinin formülize edilmiş şekli, (3) denkleminde gösterilmiştir.

$$S_i = \frac{(b(i) - a(i))}{\max\{a(i), b(i)\}} \tag{3}$$

Burada, $a(i)$, bölütün i. elemanı için, bu elemanın içinde bulunduğu bölütün diğer elemanları ile olan ortalama uzaklığını gösterir. $b(i)$ ise, bölütün i elemanı için, bu elemanın ait olduğu bölütün dışındaki bir bölüte ait elemanlar arasındaki ortalama uzaklıkların en küçüğüdür. Dolayısıyla $b(i)$, i elemanına en yakın bölütle eleman arasındaki uzaklığı verir.

S_i, $[-1,1]$ aralığında değerler alır. Eğer S_i 1'e yakın ise, ilgili eleman iyi bölütlenmiştir. 0 civarında değer almış ise, ilgili eleman başka bir bölüte de ait olabilir. -1'e yakın değer almış ise, ilgili eleman yanlış bir bölüte aittir, dolayısıyla iyi bölütlenmemiştir. Tüm imgenin bölütlenme kalitesinin ortaya çıkarılması, her bir piksele ait S_i değerlerinin ortalaması alınarak gerçekleştirilebilir.

3. BÖLÜTLEME GEÇERLİLİĞİ İLE OPTİMAL BÖLÜT SAYISININ BELİRLENMESİ

İncelenen imgede bulunan optimal bölüt sayısının belirlenmesi, eğitimsiz sınıflandırma alanındaki temel gereksinimlerden biridir. Bu tür durumlarda bölüt sayısı genellikle kullanıcı tarafından, nesnel bir kritere başvurmaksızın belirlenmektedir. Fakat bu durum her zaman doğru veya tutarlı sonuçlar vermeyebilir. Burada önerilen yöntemde; bölütleme geçerliliği indisleri, optimal bölüt sayısının belirlenmesinde kullanılabilecek nesnel bir kriter olarak sunulmaktadır.

Önerilen yöntemin işlem basamakları takip eden listede sıralanmıştır:

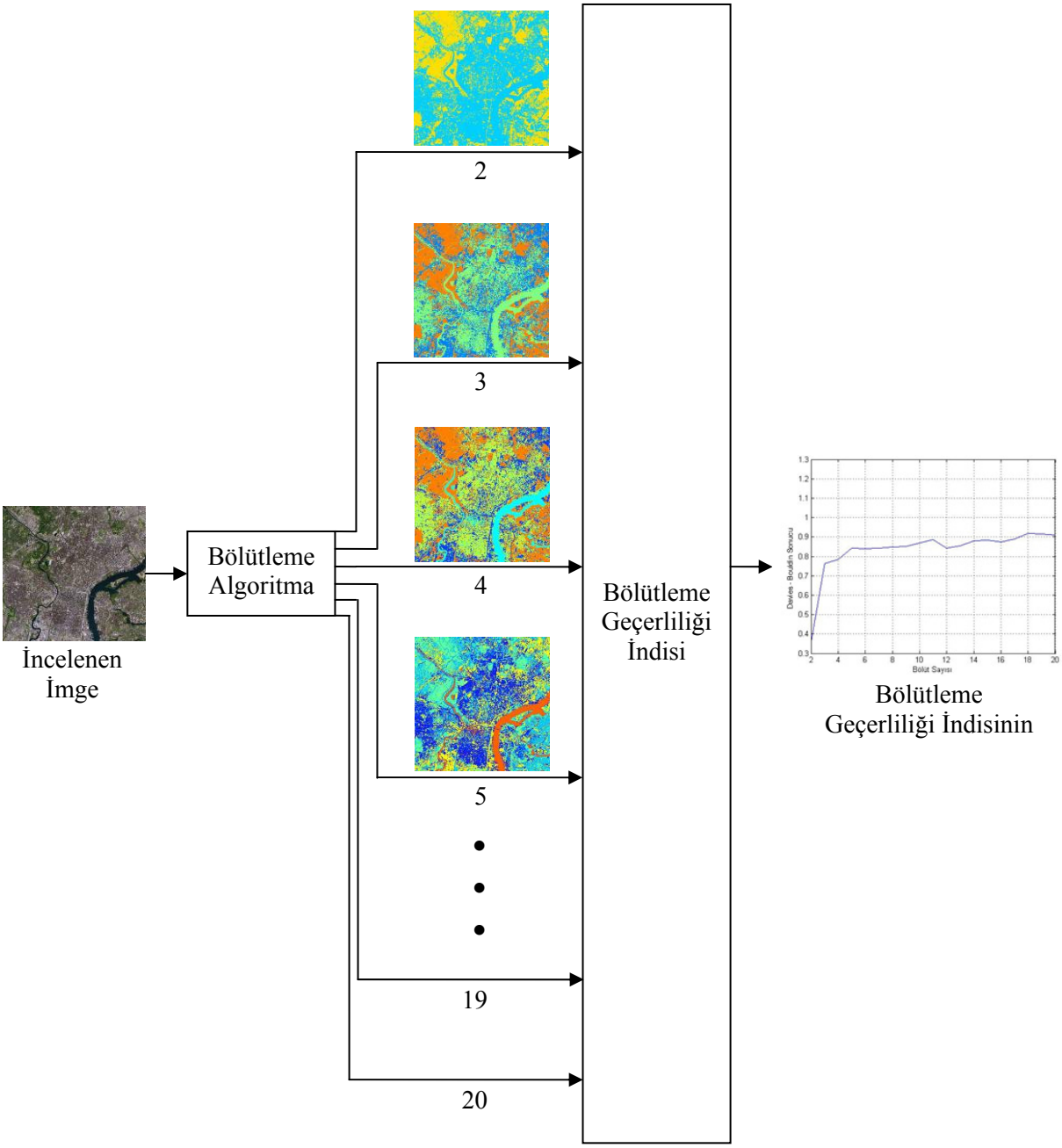
- Optimal bölüt sayısının belirlenmesi amacıyla incelenen çok bantlı imge, sırasıyla 2, 3, 4, …, 19 ve 20 bölüte ayrılır.
    - Bu çalışma kapsamında incelenen imgeler, 7 bantlı LANDSAT uydu verileridir. Bölütleme yapmak amacıyla bu 7 banttan 3'ü kullanılmaktadır. Bu bantlar, LANDSAT uydusunun
        - (kırmızı-RED, $0.6 - 0.7\mu m$)
        - (yakın kızıl ötesi-NIR, $0.76 - 0.9\mu m$) ve
        - (orta dalga kızıl ötesi-MWIR, $1.55 - 1.74\mu m$)

          bantlarıdır (Landgrebe, 2003).
    - İmgelerin bölütlere ayrılması için kullanılan yöntem, standart K-Ortalamalar bölütleme yöntemidir. Ancak, başka bölütleme yöntemleri de tamamen aynı biçimde kullanılabilir.
- Elde edilen bölütlerin bölütlenme geçerlilik düzeyinin belirlenmesi amacıyla, bölütleme geçerliliği indisleri kullanılır.
    - Yapılan incelemeler sonucunda, bölütleme geçerliliği indislerinin (Davies – Bouldin İndisi, Dunn İndisi, Silhouette İndisi) sonuç açısından farklı değerler göstermediği gözlenmiştir. Bu sebeple, gerçekleştirilen incelemelerde, hesaplama hızı açısından daha uygun olduğu gözlenen, Davies – Bouldin indisi kullanılmıştır.
- Bölütleme geçerliliği indisi bölüt sayısına göre incelenir ve optimal bölüt sayısı belirlenir.

- Bölütleme kalitesinin yüksek olması, kullanılan bölütleme geçerliliği indisine göre değişik değerlerle gösterilebilmektedir. Silhouette göstegesinde, sonuç değerinin 1'e yakın olması bölütlemenin kaliteli olduğunu gösterir. Dunn indisinde, sonuç değeri ne kadar yüksek ise, bölütleme kalitesi de o kadar yüksektir. Davies – Bouldin indisinde ise, indis değerinin küçük olması, bölütleme kalitesinin yüksek olduğunu göstermektedir.

- Bu çalışma kapsamında kullanılan Davies – Bouldin indisine ait sonuç değerinin küçük olması bölütleme kalitesinin yüksek olduğunu gösterdiğinden, elde edilen sonuçların en küçüğüne denk gelen bölüt sayısı, optimal bölüt sayısı olarak kabul edilecektir.

Önerilen yöntemin şekilsel gösterimi, Şekil 1 ile verilmiştir.



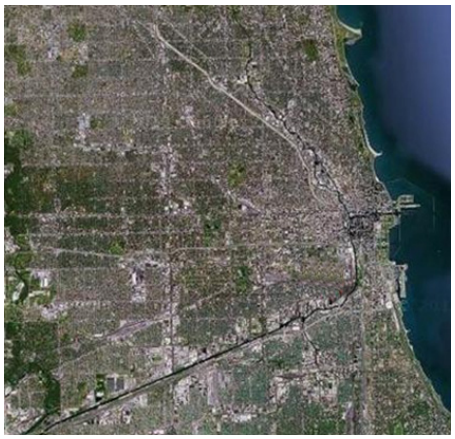
Şekil 1. Optimal Bölüt Sayısının Geçerlilik İndisine Bağlı Olarak Belirlenmesi

4. UYGULAMA

Bölütleme geçerliliği indisleri kullanılarak optimal bölüt sayısının belirlenmesi için yapılan örnek uygulamalarda kullanılacak en uygun imge veri setlerinden biri, uzaktan algılanmış çok bantlı şehir imgeleridir. Bu bölümde optimal bölüt sayısının belirlenmesi için yapılan uygulamada, kuzey Amerika'da bulunan şehirlere ait 7 bantlı LANDSAT verileri kullanılmıştır. Önceki bölümde önerilen yöntem LANDSAT imgelerine uygulanıp, imgelerdeki optimal bölüt sayısının belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılacak uygulamalarda kullanılan imgeler Baltimore, Boston, Chicago, Ithaca, New Orleans, New York, Orlando, Philadelphia, San Francisco, Washington D.C. şehirsel yerleşimlerine ait LANDSAT görüntüleridir. İncelenen bölgeler ile ilgili genel bir fikir vermesi açısından; bu yerleşim bölgelerine ait Google Maps imgeleri (RGB) aşağıda verilmiştir.

a - Baltimore

b – Boston



c – Chicago

d – Ithaca

e - New Orleans

f - New York

Şekil 2. Uygulamalarda Kullanılan Şehirlerin Google Maps Görüntüleri (Kaynak: Google).

g - Orlando

h - Philadelphia

i - San Francisco

j – Washington

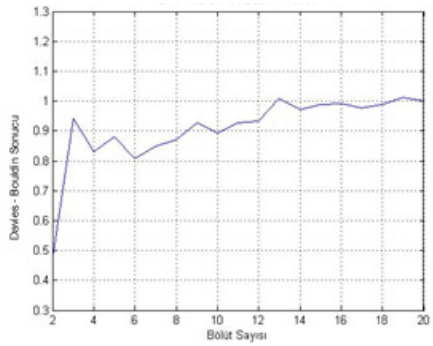
Şekil 2. Devamı.

Şekil 2 ile gösterilen şehir görüntüleri, görünür (RGB – Red, Green, Blue) bantlardaki bileşenlerin bileşimiyle oluşmuş görüntülerdir. Uygulamanın ilk adımında, şehirlere ait LANDSAT uydu görüntülerinin 3. (Kırmızı, Red), 4. (Yakın Kızıl Ötesi, NIR) ve 5. (Orta Dalga Kızıl Ötesi, MWIR) bantlarındaki bileşenler kullanılıp standart K – Ortalamalar bölütleme yöntemi çalıştırılarak, şehir görüntüleri sırasıyla, 2, 3, 4, ... 19 ve 20 bölüte ayrılmıştır. Son adımda ise elde edilen bölütlemelere ait Davies – Bouldin indisleri hesaplanmıştır. Davies – Bouldin indisinin farklı sayıdaki bölütleme için aldığı aldığı değerler her bir bölge için Şekil 3'de gösterilmiştir.

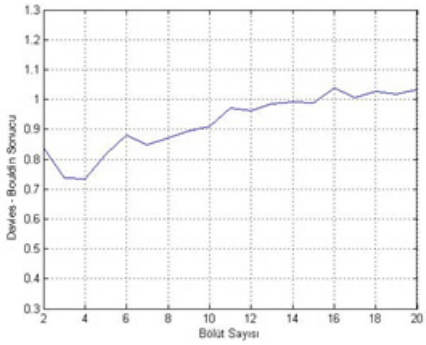
Davies – Bouldin indisinin gösterdiği değer ne kadar küçük ise, bölütleme işlemi o derece iyi yapılmış anlamına gelmektedir. Şekl 3 ile verilen sonuçlar incelendiğinde, grafiklerdeki en küçük değerlerin denk geldiği bölüt sayılarının 3, 4 ve 5 olduğu görülür. Dolayısıyla incelenen şehir görüntülerinde optimal bölüt sayısının 3, 4 veya 5 değeri olabileceği değerlendirilmektedir. Davies – Bouldin indisi sonuçlarının tüm şehirler ortalama değerleri alındığında, Şekil 4 ile gösterilen grafik oluşmaktadır.

Şekil 4 ile gösterilen grafikteki noktalar, şehirlere ait Davies – Bouldin indisi sonuçlarını, çizgi ise bu sonuçların ortalama değerlerini göstermektedir. Görüldüğü gibi incelenen şehirlerde optimal bölüt sayısı, Davies – Bouldin indisinin en küçük değeri aldığı noktaya denk gelen 4'tür.

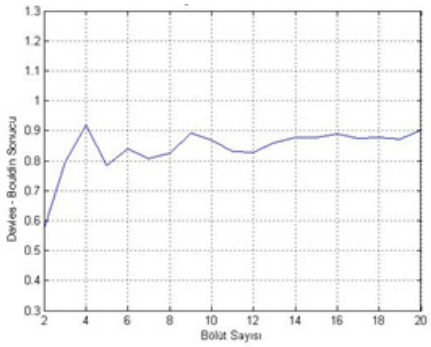
Örnek olarak Philadephia şehrine ait 7 bantlı LANDSAT uydu verisinin 3., 4. ve 5. (kırmızı – Red, yakın kızılötesi – NIR, orta dalga kızıl ötesi - MWIR) bantları kullanılarak elde edilen verinin, standart K – Ortalamalar algoritması ile bölütlenmesinin sonucu Şekil 5 ile gösterilmiştir.



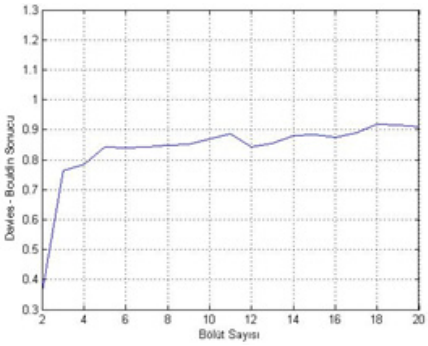
a - Baltimore



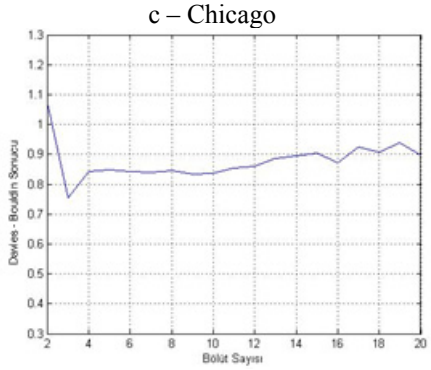
b - Boston



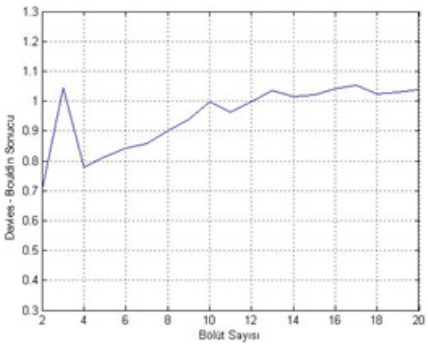
c – Chicago



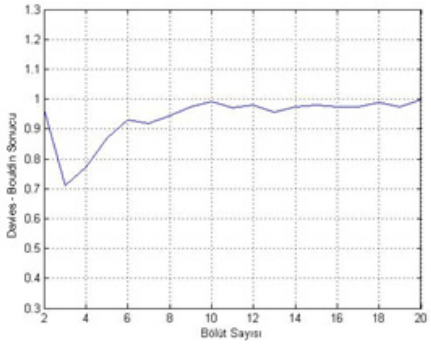
d - Ithaca



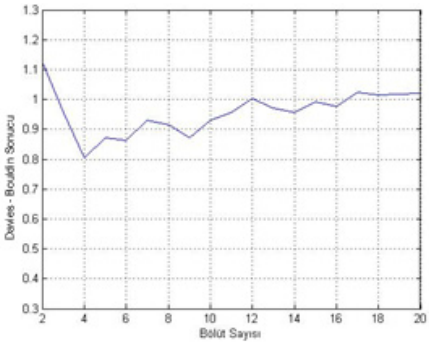
e - New Orleans



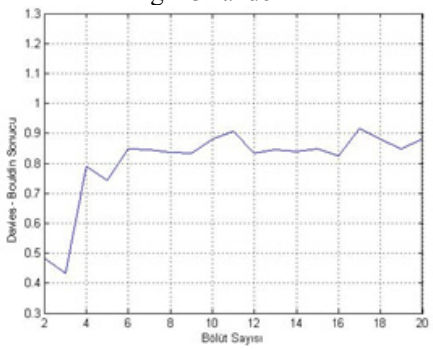
f - New York



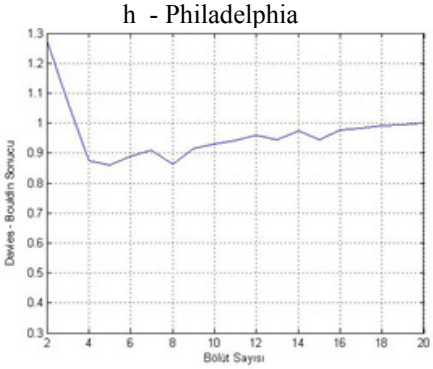
g - Orlando



h - Philadelphia

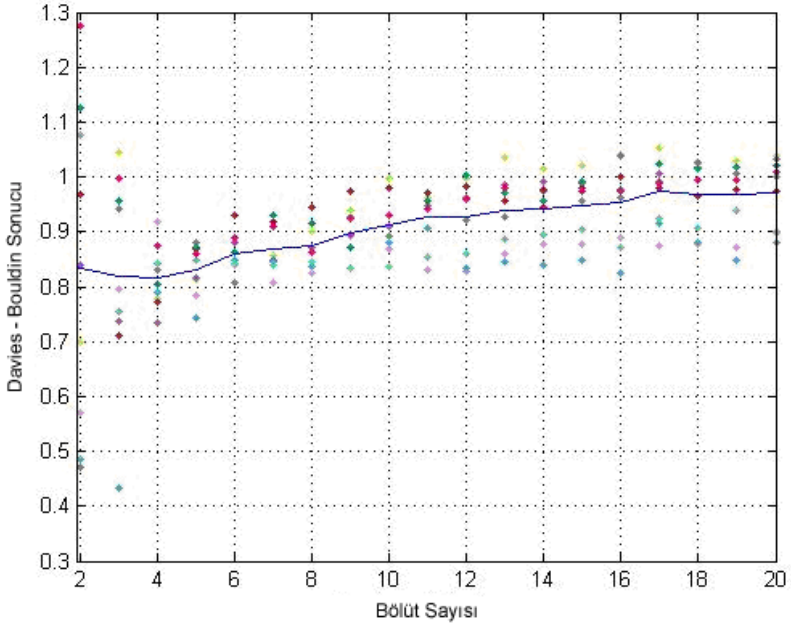


i - San Francisco

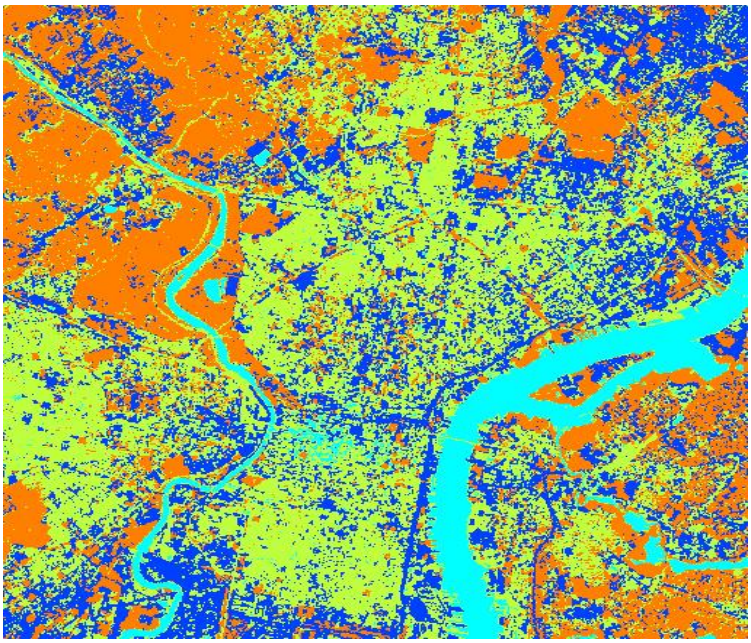


j - Washington

Şekil 3. İncelenen Bölgeler için Davies – Bouldin İndisinin Aldığı Değerler.



Şekil 4. Davies – Bouldin İndisinin Ortalama Değerleri.



Şekil 5. Philadelphia Şehrine Ait İmgenin 4 Bölüte Ayrılmış Şekli.

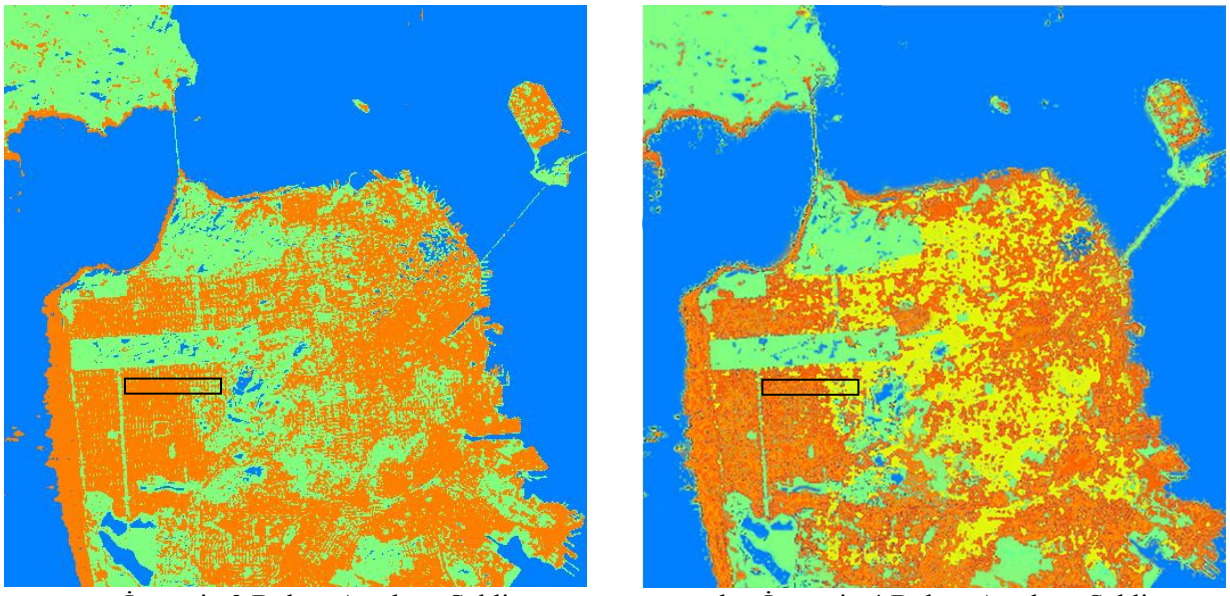
Bölütlenmiş görüntü (Şekil 5) orijinal Philadelphia görüntüsü (Şekil 2-h) ile karşılaştırıldığında bu bölütlemenin tutarlılığı yorumlanabilir. Orijinal görüntüdeki bölgelerin, bölütlenmiş görüntüde denk geldiği renkler Tablo 1 ile listelenmiştir.

Tablo 1. Philadenphia Bölgesinin Orijinal Görüntüsü İle Bölütlenmiş Görüntüsünün Karşılaştırılması.

Orijinal Görüntü (Şekil 2-h)	**Bölütlenmiş Görüntü (Şekil 5)**
Bitki Örtüsü	Turuncu
Yapılar	Açık Yeşil
Sulak Alanlar	Açık Mavi
Toprak / Asfalt	Mavi

Tablo 1 ile listelenen yüzey tipleri (bitkisel bölgeler, konutsal bölgeler, sulak bölgeler ve toprak/asfalt bölgeler), şehirsel görüntülerde tipik olarak karşılaşılabilecek yüzey tiplerindendir. Şekil 2-h ile gösterilen grafik göz önünde bulundurulursa, Philadelphia bölgesine ait imgenin, 6 veya 9 bölüte ayrılmasının da lokal olarak uygun sonuçlar vereceği değerlendirilebilir. Fakat bölütleme açısından en uygun bölüt sayısı 4'tür.

İncelenen Kuzey Amerikan şehirlerinde ortalama olarak en iyi bölütleme sayısı 4 olmasına karşın; verilen belirli bir bölge için optimal bölüt sayısı 4'den farklılık gösterebilir. Örneğin Şekil 3-i incelendiğinde San Francisco bölgesini dört yerine üç bölüte ayırmanın çok daha tutarlı bir bölütleme olduğu görülmektedir. Şekil 6'da San Francisco imgesinin üç ve dört bölüte ayrılmış biçimleri verilmektedir.



a – İmgenin 3 Bölüte Ayrılmış Şekli b – İmgenin 4 Bölüte Ayrılmış Şekli

Şekil 6. San Francisco Şehrine Ait İmgenin 3 ve 4 Bölüte Ayrılmış Şekli.

Şekil 6-a'da mavi renk su, yeşil renk bitki örtüsü ve turuncu renk ise insan yapımı binalar/yollar olarak kolayca yorumlanabilmektedir. Şekil 6-b ile Şekil 6-a karşılaştırıldığında su bulunan alanların (mavi) hemen hemen hiç değişmediği görülmektedir. Öte yandan Şekil 6-b'de sarı renk ile etiketlenmiş bazı piksellerin Şekil 6-a'da bitki örtüsü olarak göründüğü, bazılarının ise Şekil 6-a'da insan yapımı binalar/yollar olarak yorumlanmış piksellerle ilintili olduğu gözlenmektedir. San Francisco bölgesine ait LANDSAT imgesini üç bölüt olarak kolayca yorumlayabilirken, aynı hususu dört bölüt için söyleyememekteyiz.

Örneğin, Şekil 6-a'da siyah dikdörtgenle gösterilen alan, Şekil 6-b'de siyah dikdörtgenle gösterilen alan ve bu dikdörtgenlerle belirtilen alanın Google Earth'den alınan yüksek çözünürlüklü görüntüsünü gösteren Şekil 7 ile karşılaştırıldığında, San Francisco bölgesine ait görüntünün 3 veya 4 bölüte ayrılmasının farklı sonuçlar verdiği daha net olarak görülebilmektedir.

Şekil 7. Şekil 6'da Dikdörtgenlerle Gösterilmiş Alanın Orijinal Görüntüsü (Kaynak:Google).

Şekil 6-a'da siyah dikdörtgenle gösterilen alan incelendiğinde, turuncu renkle gösterilen alanların, homojen bir şekilde dağıldığı görülür. Şekil 6- b'de siyah dikdörtgenle gösterilen alan incelendiğinde ise dikdörtgen içerisindeki bölgenin 2 bölüte (turuncu ve sarı alanlar) ayrıldığı görülmektedir. Fakat Şekil 6'da siyah dikdörtgenlerle gösterilen bölgenin, Şekil 7'deki orijinal görüntüsü incelendiğinde, bölgedeki yapısal alanların homojen bir dağılıma sahip olduğu göze çarpmaktadır. Şekil 7 içinde iki farklı bölüt olarak kolaylıkla yorumlanabilecek bir hetereojenlik gözlenmemektedir. Bu değerlendirmeler; Şekil 3-i'de gösterilen ve bölgeyi 3 bölüte ayırmanın 4 bölüte ayırmaktan daha iyi sonuç vereceğini belirten Davies – Bouldin indisine ait sonucu desteklemektedir.

5. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında uzaktan algılanmış imgelerde optimal bölüt sayısının belirlenmesi için kullanılabilecek nesnel bir kriter olarak bölütleme geçerliliği indislerine dayanan bir yaklaşım sunulmuştur. Bölütleme geçerliliği indislerinin bölüt sayısına göre eniyilenmesine dayanan bu yaklaşım Davies-Bouldin indisi temel alınarak bazı kuzey Amerikan şehirlerine uygulanmıştır. 10 Kuzey Amerikan şehrine ait LANDSAT imgeleri üzerinde yaptığımız uygulamalar, bu bölgeler için optimal bölütleme sayısının, ortalama olarak, 4 olduğunu göstermiştir. Önerilen yaklaşım bir grup imgeye uygulanabileceği gibi tek bir imgeye ait optimal bölüt sayısını belirlemek için de kullanılabilir. Bu çalışmada, San Fransisco şehrine ait LANDSAT imgesi için optimal bölüt sayısının 3 olduğu ve bu üç bölüt için doğal bir yorumlama yapılabilirken; optimal olmayan 4 bölütün bazı bölgeler için kolay bir biçimde yorumlanamadığı da ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR

Xu, R., Wunsch, D.C., 2009, *Clustering* (IEEE Press).

Theodoridis, S., Koutroumbas, K., 2009, *Pattern Recognition, 4th Edition* (Academic Press).

Davies, D.L., Bouldin, D.W., 1979, A cluster separation measure, *IEEE Transactions on In Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-1 , pp 224-227.

Dunn, J.C., 1974, Well separated clusters and optimal fuzzy partitions, *Journal of Cybernetics.*, Vol 4, pp 95-104.

Rousseeuw, P.J., 1987, Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol. 20, pp 53-65.

Landgrebe, D.A., 2003, Signal Theory Methods In Multispectral Remote Sensing, pp 84-88, (Wiley – Interscience).

Google Maps, http://maps.google.com, 2010.