İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UZAKTAN ALGILAMADA GÖRÜNTÜ BİRLEŞTİRME ALGORİTMALARININ KARŞILAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Alper AKOĞUZ

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

OCAK 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UZAKTAN ALGILAMADA GÖRÜNTÜ BİRLEŞTİRME ALGORİTMALARININ KARŞILAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Alper AKOĞUZ
(504071302)

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sedef KENT PINAR

OCAK 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504071302 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Alper AKOĞUZ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"UZAKTAN ALGILAMADA GÖRÜNTÜ BİRLEŞTİRME ALGORİTMALARININ KARŞILAŞTIRILMASI"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Sedef KENT PINAR** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Doç. Dr. Mesut KARTAL** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Şinasi KAYA İstanbul Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **17 Aralık 2012**
Savunma Tarihi : **24 Ocak 2013**

Anneme ve babama,

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans öğrenimine başlamak ve üniversitede görev almak için beni teşvik eden ve tez çalışmam boyunca araştırmalarımda desteğini bir an olsun esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Sedef Kent Pınar'a en derin saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

İstanbul Teknik Üniversitesi bünyesinde Elektrik-Elektronik Fakültesi'nin kurulmasında ve bünyesindeki bölümlerin araştırma & geliştirme anlamında bu derecede gelişmesinde emeği geçen, başta Ord. Prof. Dr. Bedri Karafakıoğlu ve Prof. Dr. Mustafa Santur olmak üzere, aramızdan ayrılan hocalarımızı rahmetle ve saygıyla anıyor, eğtimim boyunca birikimleri ve emekleri ile aydınlatan güzide hocalarıma şükranlarımı sunuyorum.

Tez çalışmam süresince yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen İTÜ Uydu Haberleşmesi ve Uzaktan Algılama Uygulama Araştırma Merkezi (UHUZAM) ile İTÜ Ulusal Yazılım ve Sertifikasyon Merkezi (UYSM) çalışanlarına, UHUZAM bünyesinde çalışmalarda bulunmuş olduğum öğrencilerime ve değerli arkadaşlarım Gizem Kahveci, Sadık Bozkurt, Ahmet Serdar Buhan, Umut Çakır, Deniz Başar, Gökhan Göksu, Burak Çörekçioğlu, Adnan Özdemir, Selver Şentürk, Ajla Kulaglic, Gökhan Aracı, Özge Bayır, Meriç Yücel ve Halil İbrahim Kısakesen'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmamı, başarımın en büyük mimarı olan canımdan çok sevdiğim aileme ve mühendis olmamda etkileri çok yüksek olan Solmaz-Hasan Deneri'ye ithaf ediyorum.

Ocak 2013

Alper Akoğuz
(İTÜ EHB Araştırma Görevlisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 2
1.2 Tarihsel Gelişim 2
2. SPOT **3**
2.1 Tarihçe 3
2.2 Teknik Özellikler 4
3. GÖRÜNTÜ BİRLEŞTİRME YÖNTEMLERİ **5**
3.1 Görüntü Birleştirme Modeli 5
3.2 Pankromatik ve Multispektral Görüntülerin Birleştirilmesi 6
3.2.1 Modülasyon yöntemleri 7
3.2.1.1 Brovey dönüşümü 7
3.2.2 Bileşen değişim yöntemleri 8
3.2.2.1 PCA dönüşümü 8
3.2.2.2 IHS dönüşümü 14
3.2.2.3 Gram-Schmidt dönüşümü 16
3.2.3 Çoklu çözünürlük (süzgeç) yöntemleri 20
3.2.3.1 SFIM birleştirme 20
3.2.3.2 HFM birleştirme 21
3.2.3.3 Dalgacık dönüşümü 22
Dalgacık dönüşümü değişim yöntemi 23
Dalgacık dönüşümü toplama yöntemi I 24
Dalgacık dönüşümü toplama yöntemi II 24
Dalgacık dönüşümü katsayı yöntemi I 24
Dalgacık dönüşümü katsayı yöntemi II 25
Dalgacık dönüşümü katsayı yöntemi III 25
3.2.4 Karma yöntemler 25
3.3 Birleştirme Kalite Değerlendirme Yöntemleri 27
3.3.1 SAM 27
3.3.2 RMSE 27
3.3.3 RASE 27
3.3.4 ERGAS 28
4. TEST SONUÇLARI **29**
5. SONUÇ VE ÖNERİLER **33**
KAYNAKLAR **35**

EKLER 37
ÖZGEÇMİŞ..... 53

KISALTMALAR

MS	**:** Multispectral (Multispektral)
HS	**:** Hiperspectral (Hiperspektral)
Pan	**:** Pancromatic (Pankromatik)
CNES	**:** Cente National D'études Spatiales (Fransız Uzay Ajansı)
NASA	**:** National Aeronautics and Space Administration **(**Amerikan Uzay Ajansı)
SPOT	**:** Satellite/Système Pour l'Observation de la Terre (Yeryüzü Gözlemi Yapan Uydu/Sistem)
SSTC	**:** Services Fédéraux des Affaires Scientifiques, Techniques et Culturelles **(**Belçika Bilim, Teknik ve Kültür Merkezi)
SNSB	**:** Swedish National Space Board (İsveç Ulusal Uzay Kurulu)
TSO	**:** Terminal SpotON (SpotON Terminali)
GeoTIFF	**:** Geographic Tagged Image File Format (Coğrafik Etiketli Görüntü Dosya Biçimi)
GERALD	**:** Generic Exchange for Raw Archive Level Data (Ham Arşiv Seviyesindeki SPOT Verisi için Genel Değişim Biçimi)
ECT	**:** Equator Crossing Time (Ekvator Geçiş Zamanı)
MHz	**:** MegaHertz
QPSK	**:** Quadrature Phase Shifting Keying (Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama)
HRV	**:** High Resolution Visible (Yüksek Çözünürlüklü Görünür)
HRVIR	**:** High Resolution Visible+InfraRed (Yüksek Çözünürlüklüklü Görünür + Kızılötesi)
HRG	**:** High Resolution Geometric (Yüksek Çözünürlüklü Geometrik)
NIR	**:** Near InfraRed (Yakın Kızıl Ötesi)
SWIR	**:** Short Wave InfraRed (Kısa Dalga Kızıl Ötesi)
THR	**:** Très Haute Résolution (Süper Yüksek Çözünürlük)
ÇÇA	**:** Çoklu Çözünürlük Analizi
BD	**:** Bileşen Değişim
IHS	**:** Intensity-Hue-Saturation (Parlaklık – Renk özü - Doygunluk)
PCA	**:** Principle Component Analysis (Temel Bileşen Analizi)
GST	**:** Gram-Schmidt Transform (Gram-Schmidt Dönüşümü)
IGST	**:** Inverse Gram-Schmidt Transform (Ters Gram-Schmidt Dönüşümü)
SFIM	**:** Smoothing Filter-based Intensity Modulation (Yumuşatma Süzgeci Bazlı Parlaklık Modülasyonu)
HFM	**:** Yüksek Frekans Modülasyonu
DWT	**:** Discrete Wavelet Transform (Ayrık Dalgacık Dönüşümü)
IDWT	**:** Inverse Discrete Wavelet Transform (Ters Ayrık Dalgacık Dönüşümü)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : SPOT Programı Uyduları. 3
Çizelge 2.2 : Spot Programı Uydularının Teknik Özellikleri. 4
Çizelge 4.1 : SAM yöntemiyle birleştirme kalitesi değerlendirme…. 31
Çizelge 4.2 : RMSE yöntemiyle birleştirme kalitesi değerlendirme…. 31
Çizelge 4.3 : RASE ve ERGAS yöntemiyle birleştirme kalitesi değerlendirme…. ..32

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : Pankeskinleştirme. 5
Şekil 3.2 : PCA bazlı birleştirme. 9
Şekil 3.3 : MS bandlarının Γ vektörüne dönüştürülmesi. 10
Şekil 3.4 : IHS bazlı birleştirme. 16
Şekil 3.5 : Gram-Schmidt yöntemi. 17
Şekil 3.6 : İki boyutlu matris için dalgacık analizi. 22
Şekil 3.7 : İki boyutlu matris için dalgacık sentezi. 23
Şekil 3.8 : IHS/PCA ile dalgacık kullanılan birleştirme yöntemi. 26
Şekil 4.1 : Çalışmanın gerçekleştirildiği bölge. 29
Şekil 4.1 : Yüksek uzamsal çözünürlüklü Pan görüntü 30
Şekil 4.1 : Çalışmanın gerçekleştirildiği bölge. 30
Şekil A.1 : Brovey yöntemi ile birleştirilmiş görüntü… 38
Şekil A.2 : IHS yöntemi ile birleştirilmiş görüntü… 39
Şekil A.3 : PCA yöntemi ile birleştirilmiş görüntü… 40
Şekil A.4 : Gram-Schmidt yöntemi ile birleştirilmiş görüntü…. 41
Şekil A.5 : SFIM yöntemi ile birleştirilmiş görüntü…. 42
Şekil A.6 : HFM yöntemi ile birleştirilmiş görüntü… 43
Şekil A.7 : Dalgacık dönüşümü değişim yöntemi ile birleştirilmiş görüntü…. 44
Şekil A.8 : Dalgacık dönüşümü toplama yöntemi I ile birleştirilmiş görüntü…. 45
Şekil A.9 : Dalgacık dönüşümü toplama yöntemi II ile birleştirilmiş görüntü…. 46
Şekil A.10 : Dalgacık dönüşümü katsayı yöntemi I ile birleştirilmiş görüntü…. 47
Şekil A.11 : Dalgacık dönüşümü katsayı yöntemi II ile birleştirilmiş görüntü… 48
Şekil A.12 : Dalgacık dönüşümü katsayı yöntemi III ile birleştirilmiş görüntü…. 49
Şekil A.13 : IHS ve dalgacık yöntemi ile birleştirilmiş görüntü…. 50
Şekil A.14 : PCA ve dalgacık yöntemi ile birleştirilmiş görüntü…. 51

UZAKTAN ALGILAMADA GÖRÜNTÜ BİRLEŞTİRME ALGORİTMALARININ KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

1972'de ilk yeryüzü gözlem uydusu Landsat-1'in hizmet vermeye başlamasından bu yana uydu teknolojileri çok gelişmiş olmasına rağmen optik uzaktan algılamada, fiziksel ve teknolojik limitler sebebiyle, bazı uydu algılayıcıları algılanan bölgenin ve/veya bölgedeki cisimlerin özelliklerinin ön plana çıkmasını (çeşitli spektral bandlarda algılama yaparak) spektral olarak sağlarken, kimi algılayıcılar ise bu ayrışımı mekansal olarak sağlamaktadır.

Görüntü birleştirme algoritmaları sayesinde, pankromatik (monokromatik) algılama yapan yüksek mekansal detaya sahip olan görüntüler ile yüksek spektral çözünürlüğe sahip multispektral (elektromanyetik görünür bölge) görüntülerin bilgilerinin birleştirilerek spektral ve mekansal çözünürlüğü yüksek görüntüler elde edilmesi konusunda çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiş olup farklı modeller üzerinden sonuç görüntüleri elde edilmiştir. Elde edilen görüntülerle ilgili esas alınan bu problemin iki boyutlu bir enterpolasyon problemi olarak ele alınmasının gerekliliği ve füzyon dahilinde bağımsız görüntülerde yer alan spektral veya mekansal çözünürlüğün tam anlamıyla sonuç görüntülerine aktarılamaması sorunu yer almaktadır.

Yapılan çalışmalarda zaman içerisinde bu görüntülerin başarımı ile ilgili ölçütler de tanımlanmış olup ilgili çalışmada, 1980'lerden günümüze geliştirilmiş bu yapıların uzaktan algılamada görüntü birleştirme üzerine çalışan akademik grupların kabul etmiş olduğu dört ana kategoride incelenmiş olup bu kategoriler: modülasyon bazlı, bileşen değişim, çoklu çözünürlük analizi ve karma yöntemler olarak adlandırılmaktadır.

Modülasyon bazlı yöntemde Brovey yöntemi incelenmiş olup, bileşen değişim yönteminde PCA, IHS, Gram-Schmidt yöntemleri ele alınmıştır. Çoklu çözünürlük analizinde frekans bölgesinde süzgeçleme ve Wavelet yöntemleri ifade edilmiş; karma yöntemlerde ise bileşen değişim yöntemleri olan IHS ve PCA ile Wavelet birlikte kullanılarak görüntü birleştirme gerçekleştirilmiştir.

Detaylı olarak gösterilen bu yapıların görüntü birleştirme topluluğunun kabul etmiş olduğu kalite değerlendirme yöntemleri üzerinden karşılaştırmalı analizi yapılmış olup İstanbul Teknik Üniversitesi içerisinde kurulmuş olan Türkiye'nin ilk uydu yer istasyonu olan Uydu Haberleşmesi ve Uzaktan Algılama Uygulama Araştırma Merkezi (UHUZAM) bünyesinde algılanan SPOT 4 uydu görüntülerinin birleştirilmesi ile ilgili olarak araştırmalarda ve çalışmalarda kullanılabilecek alternatif bir model amaçlanmaktadır.

COMPARISON OF IMAGE FUSION ALGORITHMS IN REMOTE SENSING

SUMMARY

The advances in satellite technologies mainly assisted the researchers of Earth-observation on several analysis. Although there can be acquired high resolution images there stands a drawback between spectral and spatial resolution. In the satellite sensor there shall be acquired images either including numerous spectral bands from the electromagnetic wave spectrum which are called Multispectral (MS) or having sharp and detailed single band imagery which is called as Panchromatic (Pan) image.

MS imagery have richer spectral resolution and Pan imagery offers better spatial resolution so that image fusion is concerned to increase the pixel resolution and keep spatial resolution high by combining spectral and spatial information from multiple images of the same co-registered region. These results are appropriate for analysing on post-processing on numerous disciplines such as Geographical Information Systems (GIS), Remote Sensing (RS) and various civil and military applications

On satellite image fusion, many algorithms were developed since 1970s to gather achievement on this subject and can be classified in four main categories: Modulation-based, Component Substitution (CS), Multi Resolution Analysis (MRA) and Hybrid Methods.

Firstly, Modulation-based methods like Brovey is dealing about using some intensity modulation ratio to modulate spatial information from the high resolution Pan scene and adding to low resolution MS scene.

Secondly, Component Substitution Method is mainly regarded pixel based method on adding some high frequency information into MS scenes with making use of a transformation such as Principle Component Analysis (PCA), Intensity-Hue-Saturation (IHS), and Gram-Schmidt (GS).

Principle Component Analysis tries to transform the multispectral data to a new domain that have perpendicular axis lines and the effect of these domain lines are determined with larger eigenvalues. The idea is to swap the first principle component with histogram matched Pan scene (with using first principle component as reference cumulative distribution) to PC plane and applying an inverse PCA to these data set to obtain fused scene.

Intensity-Hue-Saturation method is involving about creating Intensity image and as same as PCA method, changing it with histogram matched Pan scene (with using intensity image as reference cumulative distribution) and applying an inverse IHS to obtain fused image.

Gram-Schmidt method is apatented method to obtain fused image by using Gram-Schmidt transformation, mainly regarded as Gram-Schmidt Orthogonalization or QR factorization. Low pass filter applied Pan scene and MS scene bands are used in

Gram-Schmidt transform to obtain orthonormal vectors which are perpendicular to each other similar to PCA transformation. Since it is a component substituion method, first orthonormal vector is swapped with the Pan scene which is histogram matched with first vector of Gram-Schmidt transformed matrix.

Moreover, in the third fusion category, there is concerned a multi resolution filtering analysis (extraction of data into Low Pass and High Pass filtered versions) on MS and Pan scenes and combining them with an appropriate method such as Smoothing Filter Intensity Modulation (SFIM), High Frequency Modulation (HFM) and Wavelet (Additive & Substitution based) rather than observing a weighted combination of MS and Pan scenes in the first method.

In Smoothing filter-based intensity modulation, there is used an intensity moduiaton ratio to modulate spatial detals of Pan image to MS scene. There is thought that spatial details can be extracted by appling low pass filter to multiplication of Pan and MS bands. For design of the low pass filter kernel, it is important to obtain the ratio of the pixel sizes MS and Pan.

High frequency modulation is involving about nodulating spatial information justl like the SFIM method, but differently there is not a strict definition to design low pass filter and applying it to MS scene.

Discrete wavelet transform is a special method to get the discrete results in scale domain, rather than dealing complex –may reach infinite numbers of transformed-data in the frequency domain of Fourier transform. Wavelet analysis is made by quadrature mirror filters which are filtering high passband and low passband so that there can be obtained low pass and high pass filtered of the same data. Since the study area is two dimensional, there can be obtained Low-Low filtered in both row and column domain, Low-High (which means of horizontal information), High-Low (vertical information) and High-High (diagonal information). After applying wavelet decomposition in both MS scene and Pan scene which is histogram matched with the intensity image. Low frequency details of MS scene used since spectral information is stored in low frequencies while high frequency details of Pan scene used for spatial information and they are combined to apply inverse wavelet transform to obtain pansharpened scene.

In the final category, it is used hybrid techniques on merging MS and Pan images, firstly transforming the multispectral scene by using PCA or IHS and secondy first principle component or intensity image with histogram matched Panchromatic scene are both applied multi resolution analysis with Wavelet decomposition with several quadrature mirror filters. Using low frequency details from principle component or intensity image and high frequency details from histogram matched Pan scene, and combine them with inverse discrete wavelet transformation. Finally, there shall be constructed the fused scene by performing inverse IHS or inverse PCA on the merged data of constructed I or first principle component and the remaining data set.

In this study, cloud-free SPOT 4 co-registered panchromatic and multispectral scene pairs have been used and chosen according to specific condition of having “Better Technical Quality” (in terms of having better Signal-to-Noise Ratio [SNR]), The region of interest is chosen including Istanbul Technical University Main Campus Area which is located in Maslak, Istanbul. Both Pan and MS scenes were down-sampled by a factor of two and fused scene was compared with the original MS scene, regarding as comparison reference scene.

The comparison analysis was done on computation times of serial and parallel implementations, as well as on several fusion quality assessments such as Spectral Angle Mapper (SAM), Erreur Relative Globable Adimensionelle de Synthése (ERGAS) and Relative Average Spectral Error (RASE) on different methods to determine the most efficient fusion method.

1. GİRİŞ

23 Temmuz 1972'de ilk yeryüzü gözlem uydusu Landsat 1'in fırlatılmasından bu yana gezegenimizin kaynaklarını gözlemleme konusunda pek çok uydudan yararlanılmış ve günümüzde modern uyduların yardımıyla bu eğilim aynı doğrultuda daha da geliştirilerek devam ettirilmektedir. Bu gelişime örnek olarak pasif algılama yapan modern uyduların algılayıcılarının, geçmiş yıllarda yörüngeye oturtulmuş uydulara nazaran çok daha iyi spektral ve mekansal çözünürlüklü veriler sağlayabilmesi gösterilebilir.

Spektral çözünürlük, bir algılayıcı tarafından algılanan dalgaboyu dağılımını ifade etmekte olup, algılayıcının bu toplam dalgaboyu dağılımında küçük aralıklı algılaması (yani algılanan toplam dalgaboyunun küçük aralıklara bölünmesi) yüksek spektral çözünürlüğün elde edilmesini sağlar. Bu görüntüler, algılayıcının spektral dağılımına ve sağladığı farklı katman görüntü (spektral band) adedine göre multispektral (MS) veya hiperspektral (HS) olarak isimlendirilirler. Mekansal çözünürlük ise algılayıcının algılamasının keskinliği ve detay içermesinin bir ölçüsüdür. Bu çözünürlüğe sahip görüntüler pankromatik (Pan) olarak adlandırılırlar. Pan görüntü, MS görüntüye nazaran yüksek mekansal çözünürlüğe sahip olup; MS görüntü de spektral çeşitlik bakımından oldukça zengindir.

Uzaktan algılamada görüntü birleştirme, yeryüzünde belirli bir coğrafik alanın, bir nesnenin algılanmış yüksek spektral çözünürlüklü ve yüksek mekansal çözünürlüklü görüntülerini uygun bir şekilde bir araya getirerek yüksek spektral ve mekansal çözünürlüğün birlikte sağlandığı sonuç görüntüsü elde edilmesi tekniğidir. Bu kavram aynı zamanda çok bantlı/çok algılayıcılı birleştirme, çözünürlük birleştirme, Pan+MS, multispektral/uydu görüntü füzyonu, alçak çözünürlüklü görüntünün keskinleştirilmesi, pankromatik keskinleştirme (pansharpening) isimleriyle de literatürde geçmektedir (Schowengerdt, 2007).

1.1 Tezin Amacı

Uydu görüntülerinin birleştirilmesiyle ilgili olarak çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiş olup farklı modeller üzerinden sonuç görüntüleri elde edilmiştir. Yapılan çalışmalarda zaman içerisinde bu görüntülerin başarımı ile ilgili ölçütler de tanımlanmış olup ilgili çalışmada, 1980'lerden günümüze geliştirilmiş bu yapıların karşılaştırmalı analizinin yapılması ve İstanbul Teknik Üniversitesi içerisinde kurulmuş olan Türkiye'nin ilk uydu yer istasyonu olan Uydu Haberleşmesi ve Uzaktan Algılama Uygulama Araştırma Merkezi (UHUZAM) bünyesinde algılanan SPOT 4 uydu görüntülerinin füzyonu ile ilgili olarak araştırmalarda ve çalışmalarda kullanılabilecek alternatifli bir model amaçlanmaktadır.

1.2 Tarihsel Gelişim

Optik uyduların geçmişine bakıldığında, 1972'de Amerikan Uzay Ajansı (NASA) tarafından Landsat 1 ve sonrasında Fransız Uzay Ajansı (CNES) tarafından 1986'da SPOT 1 uydusunun fırlatılışı paralelinde yeryüzü gözlem uydularından elde edilen veri setleri ile 1980'lerden itibaren multispektral görüntü füzyonu üzerine çeşitli denemeler yapılmaya başlanmış olup daha yüksek çözünürlüklü algılama yapan yeryüzü gözlem uydularının hizmet vermeye başlamasıyla mevcut yöntemlerin daha iyi çözünürlüğe sahip yeni görüntülerde aynı etkide başarım sağlamadığı gözlemlenerek daha yeni algoritmalar geliştirilmiştir. Pasif algılama yapan uyduların kırk yılı aşkın süreçte 60 m. görüntü çözünürlüklerinden 1m. ve daha da altına doğru evrilmiş olduğu göz önüne alınırsa konuyla ilgili literatürün çok zengin ve çeşitli olduğu ifade edilebilir (Collet, 2009).

2. SPOT

2.1 Tarihçe

SPOT (Satellite/Système Pour l'Observation de la Terre - yani Yeryüzü gözlemi yapan uydular/sistem) programı, 1978 yılında Fransız Uzay Ajansı (CNES)'nın, Belçika Bilim, Teknik ve Kültür Merkezi (SSTC) ve İsveç Ulusal Uzay Kurulu (SNSB) ortaklığıyla, Yeryüzü Gözlem Stratejisi'nin bir parçası olarak Fransa'da başlatılmıştır. Programın hedefleri :

- Yeryüzü kaynaklarının incelenmesi;
- İklimbilimi (klimatoloji) ve denizbilimini (oşinografi) kapsayan olayların tespiti ve öngörüsü;
- Beşeri faaliyetlerin ve doğal olayların izlenmesi.

olarak özetlenebilir. Programın ilk uydusu olan SPOT 1'in, 22 Şubat 1986'da fırlatılmasından bu yana toplam altı adet uydunun yörüngeye oturtulması ve görüntü alımı sağlanmıştır (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1 : SPOT programı uyduları.

Uydu	Fırlatılma Tarihi	Yörüngeden Çıkarılma Tarihi
SPOT 1	22 Şubat 1986	31 Aralık 1990
SPOT 2	22 Ocak 1990	14 Temmuz 2009
SPOT 3	26 Eylül 1993	14 Kasım 1997
SPOT 4	24 Mart 1998	Ocak 2013
SPOT 5	4 Mayıs 2002	2014 (beklenen)
SPOT 6	9 Eylül 2012	2024 (tasarım ömrü)

İTÜ-UHUZAM'a 17 Temmuz 2009 yılında kurulan SpotOn Terminal (TSO) sistemi ile SPOT 4 ve SPOT 5 görüntülerini günlük olarak GERALD biçiminde arşivleyebilmekte ve lisanslı olarak GeoTiff biçiminde işleyebilmektedir. İlgili tez çalışmasında, SPOT 4 optik uydularının Pan ve MS görüntülerinin birleştirilmesi esas alınmıştır.

2.2 Teknik Özellikler

SPOT uydularının teknik özellikleri Çizelge 2.2'de ifade edilmektedir.

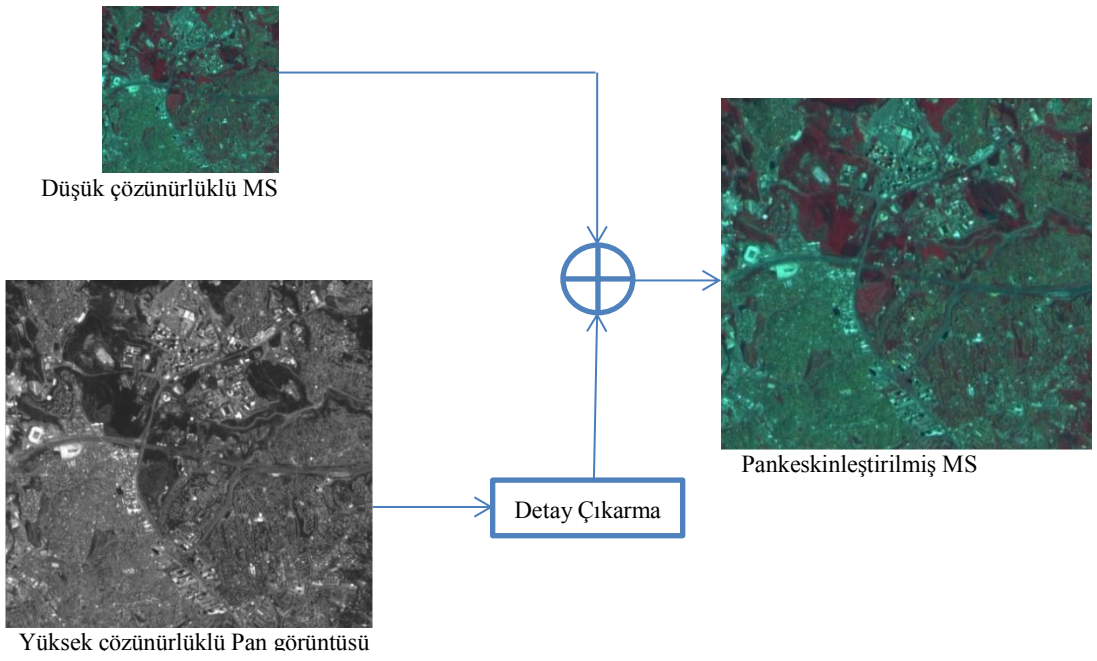
Çizelge 2.2 : SPOT programı uydularının teknik özellikleri.

	SPOT 1, 2 & 3	SPOT 4	SPOT 5
Yörünge	Güneş-senkronize		
Yerel ECT	Öğleden Önce 10:30		
Ekvator'da yükseklik	822 km		
Eğiklik açısı	98.7 derece		
Hız	7.4 km/s		
Yörünge periyodu	101. 4 dakika		
Yörünge döngüsü	26 gün		
Gün başına devir	14 + 5/26		
Döngü başına devir	369		
Uydu verici frekansı	8253 MHz (X band)		8253 - 8365 MHz (X band)
Modülasyon	QPSK		
Telemetri link	50 Mb/s		2 x 50 Mb/s
Sensör algılama açısı	± 31.06 derece		
Görüntüleme alanı	60 km x 60 km		
Görüntüleme enstrümanı	2 adet HRV	2 adet HRVIR	2 adet HRG
Spektral band ve çözünürlük	1 adet Pan (10 m) 3 adet MS (20 m)	1 adet Pan (10 m) 3 adet MS (20 m) 1 adet SWIR (20 m)	2 adet Pan (5 m) {birleştirilerek 2.5m Pan üretilir [THR]} 3 adet MS (10 m) 1 adet SWIR (20 m)
Spektral aralık	Pan : 0.51 - 0.73 µm B1 (yeşil) : 0.50 - 0.59 µm B2 (kırmızı) : 0.61 - 0.68 µm B3 (NIR) : 0.78 - 0.89 µm	Pan : 0.61 - 0.68 µm B1 (yeşil) : 0.50 - 0.59 µm B2 (kırmızı) : 0.61 - 0.68 µm B3 (NIR) : 0.78 - 0.89 µm B4 (SWIR) : 1.58 - 1.75 µm	Pan : 0.48 - 0.71 µm B1 (yeşil) : 0.50 - 0.59 µm B2 (kırmızı) : 0.61 - 0.68 µm B3 (NIR) : 0.78 - 0.89 µm B4 (SWIR) : 1.58 - 1.75 µm
Görüntü kodlama	8 bit		

3. GÖRÜNTÜ BİRLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

3.1 Görüntü Birleştirme Modeli

Veri birleştirme, farklı kaynaklardan toplanan veri ve bilgilerin kullanılması sonucunda iyileştirilmiş/geliştirilmiş bilgiye ulaşmayı sağlayan bir işlemdir. Genderen ve Pohl (1994), bu genel kavram üzerinden görüntü birleştirmenin tanımını "Görüntü birleştirme, iki veya daha fazla farklı görüntünün belirli bir algoritma kullanılarak yeni bir görüntü oluşturmak üzere bir araya gelmesinden oluşan kombinasyondur" olarak yapmıştır. Bu tanım dahilinde uzaktan algılamada görüntü birleştirme veya pankromatik keskinleştirme (pankeskinleştirme) , yüksek mekansal çözünürlüklü Pan görüntülerin kullanılarak, MS görüntülerin mekansal çözünürlüğünün iyileştirilmesi konusuyla ilgilenmektedir. Dolayısıyla pankeskinleştirme çalışması, yüksek mekansal çözünürlüklü görüntündeki mekansal detayların çıkarılarak, bu detayların mekansal çözünürlüğü düşük olan görüntüye eklenmesi şeklinde modellenebilir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 : Pankeskinleştirme.

Pankeskinleştirme işlemi dört ana basamaktan oluşmaktadır :

- MS görüntüsünün Pan görüntüye eşçakıştırılması (co-registration);
- MS görüntünün ölçeğinin büyütülmesi;
- Pan görüntüden mekansal bilginin çıkartılması;
- Çıkartılan mekansal bilginin MS görüntüye eklenmesi.

SPOT, ETM+, IKONOS, OrbView, QuickBird vb. bir çok uydunun algılayıcısıyla multispektral bandlar ve bu MS bandlara eşçakıştırılmış pankromatik band algılaması aynı zaman diliminde eşzamanlı olarak gerçekleştirilir (Schowengerdt, 2007). Dolayısıyla füzyona tabii tutulacak MS ve Pan görüntüleri arasında zamansal gecikme sorunu olmayacağı gibi görüntüler eşçakıştırmalı olarak algılandığından ötürü yukarıda ifade edilen işlem maddeleri üç basamağa indirgenmiş olur.

3.2 Pankromatik ve Multispektral Görüntülerin Birleştirilmesi

Pankeskinleştirme modelinde, ölçeği büyütülmüş MS görüntü ile Pan görüntüden çıkartılmış mekansal bilgiler bir ağırlık katsayısı ile çarpılarak, birleştirilmiş MS görüntüsü elde edilir **(3.1)**.

$$\hat{M} = \tilde{M} + w\ddot{P} \qquad \textbf{(3.1)}$$

Denklem **(3.1)** 'de $\hat{M}$, pankeskinleştirilmiş MS görüntüyü; $\tilde{M}$, ölçeği büyütülmüş MS görüntüyü; $\ddot{P}$, Pan görüntüden çıkartılan mekansal detayları; w , ölçeklenmiş MS görüntüye eklenecek olan detay miktarını kontrol eden ağırlık katsayısıdır.

Yukarıda ifade edilmiş olan model, çoğu pankeskinleştirme yönteminde kullanılıyor olmakla birlikte özellikle son beş yılda geliştirilmeye çalışılan karmaşık birleştirme modelleri (örneğin Wavelet dönüşümü), denklem **(3.1)'**e yakın bir model kullanmasına karşın bu yapıya bire bir uymamaktadır. Buna bağlı olarak pankeskinleştirme işlemlerinin bu denli çeşitli olması bir sınıflandırma ihtiyacını da beraberinde getirmektedir. Yöntemlerin sınıflandırılması, görüntü birleştirme işlemlerinin anlaşılması için faydalı olmaktadır; ancak uzaktan algılama görüntü birleştirme topluluğu tarafından genel geçer kabul edilmiş bir model bulunmamaktadır (Collet, 2009). Bu alanda yer alan çeşitlilik, her kesimin mütabık

olacağı bir sınıflandırmanın yapılabilirliğini de oldukça güç kılmaktadır. Genel olarak topluluğun kabul ettiği metod sınıflandırması şu şekildedir :

- Modülasyon bazlı yöntemler;
- Bileşen değişim (BD) bazlı yöntemler;
- Çoklu çözünürlük analizi (ÇÇA) bazlı yöntemler;
- Karma yöntemler.

3.2.1 Modülasyon yöntemleri

Bu yöntemde öncelikli olarak MS görüntü bandlarının ağırlıklandırılmış doğrusal kombinasyonlarından yararlanılarak bir ara görüntü hazırlanır ve her piksel için Pan görüntünün bu ara görüntüye oranı hesaplanır ve sonrasında bu oran ile ölçeği yükseltilmiş MS görüntünün her bir bandı ile çarpılarak birleştirilmiş görüntü elde edilir (Zhang, 2008). Brovey dönüşümü bu bölümde incelenecek olan modülasyon yöntemidir.

3.2.1.1 Brovey dönüşümü

Brovey dönüşümü, renklilik dönüşümünden alıntı bir yöntem olup, Pan görüntünün mekansal detaylarını modüle etmek için parlaklık modulasyon oranını kullanmaktadır (Gillespie ve diğ., 1987). Yöntemin uygulanması şu şekildedir:

- MS görüntünün her bandının Pan görüntü boyları esas alınarak ölçeğinin büyütülmesi;
- Ölçeği büyütülmüş MS görüntüden parlaklık görüntüsü elde edilmesi;
- Modülasyon oranını kullanarak birleştirilmiş MS bantların ayrık olarak teker teker oluşturulması.

Matematiksel olarak ifade etmek gerekirse:

$$\tilde{I} = \frac{1}{n} \sum_{band=1}^{n} \tilde{M}_{band} \qquad \textbf{(3.2)}$$

Burada $\tilde{I}$, parlaklık görüntüsü olup; $\tilde{M}_{band}$, ölçeği yükseltilmiş MS görüntünün bir bandını; n, MS görüntüdeki toplam band sayısını ifade etmektedir. Buna göre birleştirme işlemi şu şekilde olacaktır:

$$\hat{M}_{band} = \tilde{M}_{band} \frac{P}{\tilde{I}} \quad \textbf{(3.3)}$$

$\hat{M}_{band}$, pankeskinleştirilmiş görüntünün bir bandını göstermekte olup; $\tilde{M}_{band}$, ölçeği yükseltilmiş MS görüntünün bir bandını; P, pankromatik görüntüyü; $\tilde{I}$, parlaklık görüntüsünü; bunların oranı ise modülasyon oranını ifade etmektedir. Denklem **(3.3)** yeniden düzenlenecek olursa:

$$\begin{aligned} \hat{M}_{band} &= \tilde{M}_{band} \frac{P}{\tilde{I}} + \tilde{M}_{band} - \tilde{M}_{band} \\ \hat{M}_{band} &= \tilde{M}_{band} + \left(\tilde{M}_{band} \frac{P}{\tilde{I}} - \tilde{M}_{band} \right) \\ \hat{M}_{band} &= \tilde{M}_{band} + \frac{\tilde{M}_{band}}{\tilde{I}} \left(P - \tilde{I} \right) \end{aligned} \quad \textbf{(3.4)}$$

elde edilecektir. Bu yapı esasında Denklem **(3.1)**'de ifade edilen pankeskinleştirme modeliye örtüştürüldüğü zaman ($P - \tilde{I}$) Pan görüntüden çıkan mekansal detayları; $\tilde{M}_{band} / \tilde{I}$ oranı da ağırlık katsayısıdır.

3.2.2 Bileşen değişim yöntemleri

Pankeskinleştirme modelinde ifade edilen yapı çerçevesinde Pan görüntüsünden yüksek frekans detaylarını çıkaracak şekilde süzgeçleme işlemlerini gerçekleştirmeyen yapılar, bileşen değişim yöntemleri olarak ifade edilir. Bu bölümde incelenecek olan yöntemlerin gerçeklenmesi için esas alınan fikir, multispektral görüntünün bir dönüşüm uzayına doğru dönüştürülmesi, bu uzaydaki baskın bileşenin, detay bilgilerinin varolduğu yüksek çözünürlüklü pankromatik görüntü ile değiştirilmesi ve değişim sonucunda zaman uzayına geri dönüştürülmesi olarak özetlenebilir. Temel bileşen analizi (PCA), parlaklık-renk özü-doygunluk (IHS) ve Gram-Schmidt dönüşümü (GST) bu bölümde incelenecek olan bileşen değişim yöntemleridir.

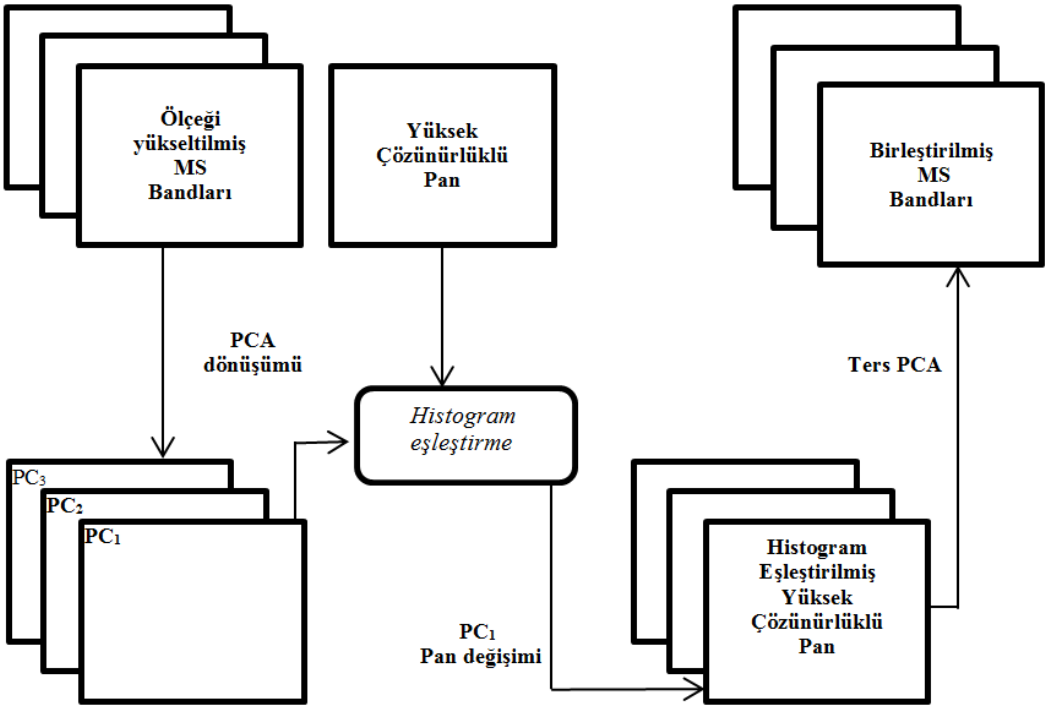
3.2.2.1 PCA dönüşümü

Temel bileşen analizi (PCA), belirli bir veri kümesinin ortogonal düzleme matematiksel izdüşümünü sağlayan bir yöntemdir. PCA uygulandıktan sonra oluşan bileşenlerin ortogonal olması nedeniyle lineer olarak ilintisiz olmaları sağlanmış

olur. Başlangıç veri kümesinde (MS uydu görüntüsü bandları) uygulanacak olan temel bileşen analizinde, toplam varyansın da ortogonal bileşenler üzerinde ifade edilmesi sonucunda özdeğerin en yüksek olduğu temel bileşen (ilk bileşen) varyansın önemli bir kısmına karşılık gelmektedir. Chavez (1991)'in çalışmasında ifade ettiği şekilde yöntemin uygulanması aşağıdaki gibidir:

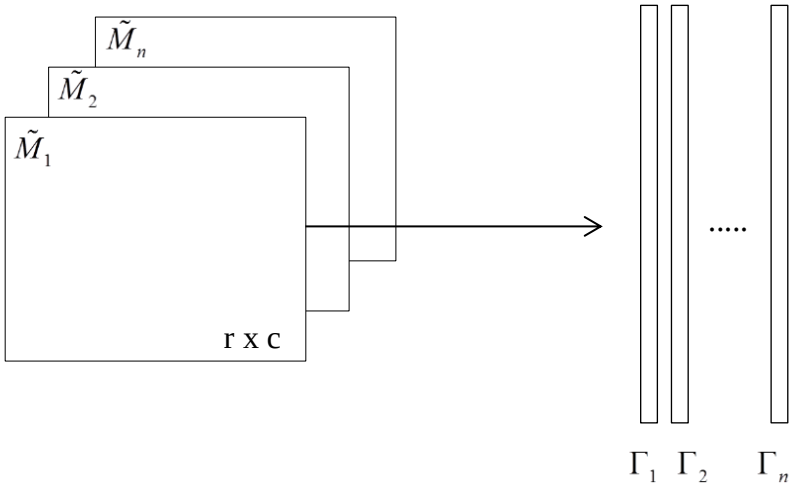
- MS görüntünün her bir bandının Pan görüntü boyutları esas alınarak ölçeğinin büyütülmesi;
- Ölçeği büyütülmüş MS görüntü bandları arasında PCA uygulanması;
- Pan görüntünün, ilk temel bileşene göre histogramının eşleştirilmesi;
- İlk temel bileşenin histogram eşleştirilmiş Pan görüntüyle değiştirilmesi;
- Ters PCA dönüşümü uygulayarak birleştirilmiş görüntünün elde edilmesi.

PCA bazlı birleştirme işleminin grafiksel gösterimi Şekil 3.2'de verilmektedir.



Şekil 3.2 : PCA bazlı birleştirme.

Ölçeği büyütülmüş MS görüntünün bandları arasında PCA uygulanabilmesi için önce her bandın Karhunen-Loéve dönüşümüne tabii tutularak oluşan vektör Γ_i olarak adlandırılsın (Şekil 3.3). Buna göre Γ vektörü her bandın satırlarının (her r satırda c eleman) veya sütunlarının (her c sütunda r eleman) uç uca eklenmesiyle (r*c)x1'lik sütun vektörü olarak elde edilir.



Şekil 3.3 : MS bandlarının Γ vektörüne dönüştürülmesi.

$$\Psi = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Gamma_i \qquad \textbf{(3.5)}$$

Denklem **(3.5)**'te ifade edilen Ψ, Γ vektörlerinin ortalama vektörüdür. Γ evrilmiş sütun vektörü olup, n toplam bant sayısını ifade etmektedir. Bu ortalama vektör her bir Γ vektöründen çıkarılarak ortalaması (beklenen değeri) sıfır olan bir veri kümesi elde edilmiş olur.

$$\begin{aligned}\Phi_i &= \Gamma_i - \Psi \\ A &= \begin{bmatrix}\Phi_1 & \Phi_2 & \dots & \Phi_n\end{bmatrix}\end{aligned} \qquad \textbf{(3.6)}$$

Burada Φ, ortalamadan çıkarılmış sütün vektörünü ifade ederken her bant için oluşan bu vektörlerin bir araya getirilmesiyle *A* matrisi elde edilmiş olur. Matrisin boyutları (r*c) x n'liktir.

$$C = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\Phi_i\Phi_i^T = \frac{1}{n-1}AA^T \qquad \textbf{(3.7)}$$

Temel bileşenlerin hesaplanacağı kovaryans matrisi C'nin ifadesi Denklem **(3.7)**'de verilmiştir. C matrisinin boyutlarının (r*c) x (r*c) şeklinde olması ve uydu görüntüsü üzerine çalışırken satır ve sütun sayısını çok büyük olmasından ötürü temel bileşenlerin (yani en yüksek özdeğere göre sıralanmış özvektörlerin) hesaplanması gittikçe zorlaşmaktadır. Bu noktada Turk (1991), özdeğer ve özvektör

hesaplama için AA^T yerine boyutu (r*c) x (r*c) ye göre çok daha küçük olan n x n'lik A^TA matrisinin kullanılmasını önermiştir. Buna göre AA^T ve A^TA matrisinin özdeğer ve özvektör hesabı:

$$\left(AA^T\right)u_i = \mu_i u_i \quad \textbf{(3.8)}$$

$$\left(A^TA\right)v_i = \lambda_i v_i \quad \textbf{(3.9)}$$

şeklindedir. AA^T matrisinin özdeğerleri μ_i ve özvektörleri u_i ; A^TA matrisinin özdeğerleri λ_i *ve* özvektörleri v_i dir. Denklem **(3.9)**'un her iki yanı A matrisi ile çarpılacak olursa:

$$\begin{aligned} A\left(A^TA\right)v_i &= A\lambda_i v_i \\ \left(AA^T\right)Av_i &= \lambda_i Av_i \\ \left(AA^T\right)\left(Av_i\right) &= \lambda_i\left(Av_i\right) \\ C\left(Av_i\right) &= \lambda_i\left(Av_i\right) \end{aligned} \quad \textbf{(3.10)}$$

Denklem **(3.8)** ve **(3.10)** 'dan

$$\begin{aligned} \mu_i &= \lambda_i \\ u_i &= Av_i \end{aligned} \quad \textbf{(3.11)}$$

elde edilir. Böylelikle A^TA matrisinin özdeğer ve özvektörleri hesaplandıktan sonra v özvektörleri A matrisi ile çarpılarak u özvektörleri elde edilir. Özvektörlerin normunun 1 olabilmesi için denklem **(3.11)**

$$u_i = \frac{Av_i}{\left\|Av_i\right\|} \quad \textbf{(3.12)}$$

şeklinde revize edilmelidir. En yüksek özdeğere göre sıralı şekilde elde edilen u özvektörleri ortonormal bir yapı oluşturur. PCA uzayından verinin kayıpsız olarak döndürülebilmesi için en yüksek *n-1* adet özvektör kullanılması yeterli olacaktır. Buna göre oluşturulacak temel bileşen uzayını tanımlayan u ortonormal vektörlerinden oluşan U matrisi

$$U = \left[u_1 \quad u_2 \quad \ldots \quad u_{n-1}\right] \quad \textbf{(3.13)}$$

şeklinde tanımlanmıştır. Eğer verilerin kayıpsız geri elde edilmesi istenirse

$$w_{coef} = U^T A \tag{3.14}$$

Denklem **(3.14)**'te belirtilen w_{coef}, A matrisinin sütünlarında yer alan ve ortalamaları sıfır olan sütün vektörleri haline getirilmiş olan bantların ilgili vektörüne izdüşüm katsayılarını ifade etmektedir. Buradan verinin geri getirilmesi için kullanılacak olan yapı denklem **(3.6)** ve **(3.14)**'ten

$$\begin{aligned} Uw_{coef} &= U\left(U^T A\right) \\ Uw_{coef} &= \left(UU^T\right) A \end{aligned} \tag{3.15}$$

U ortonormal vektörlerden oluşan bir ortonormal matris olduğu için ortonormal matrisin tersi, transpozuna eşittir.

$$\begin{aligned} U^{-1} &= U^T \\ UU^T &= I \end{aligned} \tag{3.16}$$

Denklem **(3.16)**'da U, normu bir olan özvektörler matrisi olup, I birim matrisi ifade etmektedir. Buna göre denklem **(3.15)** ve **(3.16)**'dan

$$\begin{aligned} Uw_{coef} &= \left(UU^T\right) A \\ Uw_{coef} &= \left(I\right) A = A \\ Uw_{coef} &= A \end{aligned} \tag{3.17}$$

sonucu elde edilir. Ortalama vektörü Ψ, A'nın her bir sütununa geri eklenerek sütun vektörüne dönüştürülmüş bantlar orjinal Γ halinde geri elde edilebilir olacaktır.

$$\begin{aligned} A &= \left[\Phi_1 \quad \Phi_2 \quad \ldots \quad \Phi_n\right] \\ \Gamma_i &= \Phi_i + \Psi \end{aligned} \tag{3.18}$$

Temel bileşenlerin elde edilmesinden orjinal veri kümesinin tekrar elde edilmesine kadar gerçekleştirilen işlemler "Ters PCA Dönüşümü" olarak adlandırılır.

Görüntü birleştirme işlemlerinde ölçeği yükseltilmiş MS görüntüler için en yüksek özdeğerli *n-1* (büyükten küçüğe doğru) sıralı U matrisi ve w_{coef} vektörü elde edildikten sonra en yüksek özdeğerli yani ilk temel bileşenle histogram eşleştirmesi

yapılan Pan görüntü P_{hm} halini aldıktan sonra Γ_{Phm} vektörü şeklinde (Karhunen-Loéve dönüşümüne tabii tutularak satırların veya sütunların uç uca eklenmesiyle) U matrisine, ilk temel bileşen yerine yerleştirilir ve değiştirilen matris U_{mod} adını alır.

$$U_{\text{mod}} = \begin{bmatrix} \Gamma_{P_{hm}} & u_2 & \dots & u_{n-1} \end{bmatrix} \tag{3.19}$$

Birleştirilmiş görüntünün bantlarını elde etmek için ters PCA dönüşümü, denklem **(3.15)** ve **(3.18)**'deki gibi uygulanır.

$$\begin{aligned} A_{\text{mod}} &= U_{\text{mod}} w_{coef} \\ A_{\text{mod}} &= \begin{bmatrix} \Phi_{1,\text{mod}} & \Phi_{2,\text{mod}} & \dots & \Phi_{n,\text{mod}} \end{bmatrix} \\ \Gamma_{i,\text{mod}} &= \Phi_{i,\text{mod}} + \Psi \end{aligned} \tag{3.20}$$

$\Gamma_{i,\text{mod}}$ sütun vektörlerinin orjinal r x c haline döndürülmesiyle füzyona uğramış görüntünün bandları elde edilmiş olur. Yukarıda anlatılmış olan PCA yapısının blok matrisler üzerinden ifadesi

$$\begin{bmatrix} PC_1 \\ PC_2 \\ \dots \\ PC_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{M}_1 \\ \tilde{M}_2 \\ \dots \\ \tilde{M}_n \end{bmatrix} \tag{3.21}$$

şeklinde gösterilecek olursa burada PC matris formundaki temel bileşenleri; a dönüşüm matrisi katsayılarını; $\tilde{M}$ ölçeği yükseltilmiş MS görüntünün bantlarını belirtmektedir. Buna göre ters PCA dönüşümü ile elde edilecek pankeskinleştirilmiş görüntü bantları

$$\hat{M} = A_{tm}^{-1} S' \tag{3.22}$$

olarak yazılabilir. S', PC grubunun birinci vektörüyle Pan'ın değiştirilmesi sonucu elde edilen matris olup A_{tm}, ortonormal olduğu için tersi transpozuna eşit olacaktır.

$$\begin{bmatrix} \hat{M}_1 \\ \hat{M}_2 \\ \dots \\ \hat{M}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & \dots & a_{n1} \\ a_{12} & a_{22} & \dots & a_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{1n} & a_{2n} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{hm} \\ PC_2 \\ \dots \\ PC_n \end{bmatrix} \tag{3.23}$$

Denklem **(3.23)**'de tanımlanan füzyonda ters PCA genel denklemi bantlara göre

$$\hat{M}_j = a_{1j} P_{hm} + \sum_{i=2}^{n} a_{ij} PC_i \qquad \textbf{(3.24)}$$

biçimini alır. Denklem **(3.24)**'te yer alan pankeskinleştirme modelinde Pan görüntüsünün belirli bir a_{1j} ağırlık katsayısı ile MS görüntüye eklendiği gözlemlenmektedir. Mekansal bilginin aktarılması için Pan görüntünün yüksek frekans bilgisinin eklenmesi gerekirken, model üzerinde görülebildiği üzere Pan görüntü hem alçak hem yüksek frekans bilgisini belirli bir ağırlık katsayısı ile füzyon bandlarına taşıyacaktır. Buradan da PCA dönüşümü ile elde edilen görüntü füzyonunun, keskinliğin yanı sıra spektral bozulma getirme eğilimi olduğu gözlemlenebilir. Pan görüntünün ilk temel bileşene göre histogram eşleştirmesinin yapılarak sisteme eklenmesi spektral bozulmayı genel olarak azaltmaktadır.

3.2.2.2 IHS dönüşümü

IHS (Parlaklık - Renk özü – Doygunluk) dönüşümü işlemsel karmaşıklığının düşük olmasından ötürü popüler bir füzyon yöntemidir. IHS dönüşümü ve geri dönüşüm yapısı tanımlanan renk modeline göre farklılıklar gösterebilir. IHS dönüşüm yönteminin uygulanması aşağıdaki gibidir:

- MS görüntünün her bir bandının Pan görüntü boyutları esas alınarak ölçeğinin büyütülmesi;
- Ölçeği büyütülmüş MS görüntüsüne IHS uygulanması;
- Pan görüntünün, parlaklık (I) görüntüsüne göre histogramının eşleştirilmesi
- I görüntüsünün yerine histogram eşleştirmesi yapılmış Pan görüntüsü kullanılarak ters IHS dönüşümü ile birleştirilmiş görüntünün bantlar halinde elde edilmesi.

Bu birleştirme süreci Şekil 3.4'te ifade edilmiştir. Multispektral görüntünün bulunduğu uzaydan IHS dönüşümü uygulandığı zaman aslında I-v_1-v_2 dönüşümü gerçekleştirilmektedir.

$$\begin{aligned} v_1 &= S\cos(H) \\ v_2 &= S\sin(H) \end{aligned} \qquad \textbf{(3.25)}$$

Denklem **(3.25)**'te *H*, renk özünü; *S*, doygunluk değerini; v_1 ve v_2, *I* parlaklık eksenine ve birbirlerine dik olan eksenleri ifade etmektedir. Buna göre IHS dönüşümü

$$\begin{bmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{-\sqrt{2}}{6} & \frac{-\sqrt{2}}{6} & \frac{2\sqrt{2}}{6} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{M}_1 \\ \tilde{M}_2 \\ \tilde{M}_3 \end{bmatrix} \qquad \textbf{(3.26)}$$

şeklindedir. Burada $\tilde{M}_1$, $\tilde{M}_2$, $\tilde{M}_3$ ölçeği yükseltilmiş multispektral görüntünün her bir bandını, *I* parlaklık matrisini, v_1 ve v_2 , *I*'ya ve birbirlerine dik olan eksen yapılarını ifade etmektedir. Buna bağlı olarak da ters IHS dönüşümü

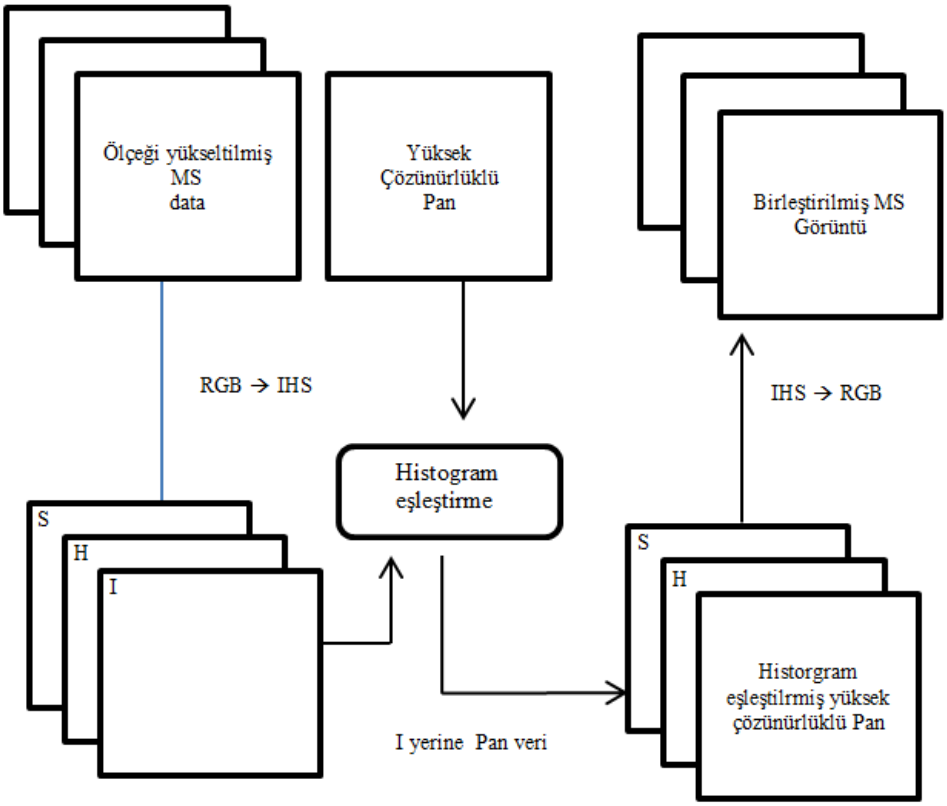
$$\begin{bmatrix} \tilde{M}_1 \\ \tilde{M}_2 \\ \tilde{M}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \qquad \textbf{(3.27)}$$

şeklinde tanımlanır. Burada *I* yerine histogram eşleştirilmiş pankromatik görüntü kullanıldığı için yapı

$$\begin{aligned} \hat{M}_1 &= P_{hm} - \frac{\tilde{v}_1}{\sqrt{2}} + \frac{\tilde{v}_2}{\sqrt{2}} \\ \begin{bmatrix} \hat{M}_1 \\ \hat{M}_2 \\ \hat{M}_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \tilde{M}_1 \\ \tilde{M}_2 \\ \tilde{M}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{hm} - \frac{1}{3}\left(\tilde{M}_1 + \tilde{M}_2 + \tilde{M}_n\right) \\ P_{hm} - \frac{1}{3}\left(\tilde{M}_1 + \tilde{M}_2 + \tilde{M}_n\right) \\ P_{hm} - \frac{1}{3}\left(\tilde{M}_1 + \tilde{M}_2 + \tilde{M}_n\right) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \hat{M}_1 \\ \hat{M}_2 \\ \hat{M}_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \tilde{M}_1 \\ \tilde{M}_2 \\ \tilde{M}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{hm} - \tilde{I} \\ P_{hm} - \tilde{I} \\ P_{hm} - \tilde{I} \end{bmatrix} \end{aligned} \qquad \textbf{(3.28)}$$

şeklinde ifade edilebilir.

Denklem $\hat{M}_1$, $\hat{M}_2$, $\hat{M}_3$ pankeskinleştirilmiş görüntünün bantlarını göstermekte olup; P_{hm}, histogramı eşleştirilmiş Pan görüntüyü ifade etmektedir. Denklem **(3.1)'**deki model ile **(3.28)** karşılaştırıldığında, ağırlık katsayısının bir olarak alınmış olduğu,eklenen mekansal bilginin histogramı eşleştirilmiş Pan ve parlaklık görüntsü arasındaki farktan geldiği düşünülebilir.



Şekil 3.4 : IHS bazlı birleştirme.

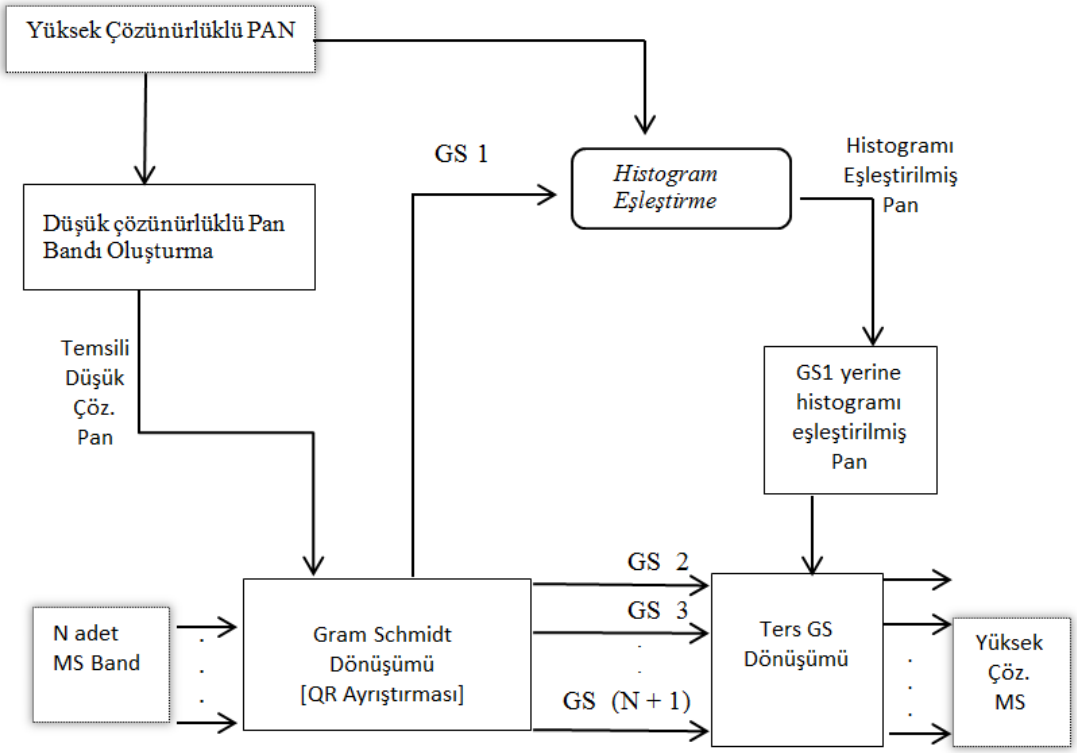
PCA örneğinde olduğu gibi eğer Pan görüntü ters IHS dönüşümünde doğrudan kullanılırsa sonuç görüntüsünde spektral bozulmalara rastlanabilir. Bunun sebebi olarak Pan görüntünün düşük çözünürlüklü parlaklık matrisine istatistiksel uyuşmazlığı (ortalama, varyans bn.) belirtilebilir. Histogram eşleştirme yapılarak spektral bozulma sonuç görüntüsünde asgariye indirilmeye çalışılır.

3.2.2.3 Gram-Schmidt dönüşümü

Gram-Schmidt dönüşümü (GST) ile görüntü birleştirme, 4 Ocak 2000 tarihinde Craig A. Laben ve Bernard V. Brower tarafından ABD'de patent almış ve çeşitli uzaktan algılama programlarında kullanılan bir yöntemdir. Gram-Schmidt dönüşüm yönteminin uygulanması için gerekli işlemler şu şekildedir:

- Pan görüntünün bir bulanıklaştırma süzgecinden geçirilerek ölçeğin MS görüntü ebatında düşürülmesi (Elde edilen bu banda temsili düşük çözünürlük Pan bandı denir);
- Ölçeği düşürülmüş olan bu Pan görüntü orjinal ölçeğine yükseltilerek PCA örneğinde olduğu gibi iki boyutlu veri kümesinin bir boyutlu sütun vektörü olarak düzenlenmesi (Bu vektör Gram-Schmidt dönüşümü için ilk temel vektör olacaktır);
- Düşük çözünürlüklü MS görüntünün bandları da bir boyutlu sütun vektörüne dönüştürülerek Gram-Schmidt matrisine eklenmesi;
- Nihai GS matrisi QR ayrıştırması yapılarak ortonormal vektörlerden oluşan Q matrisi ve üst üçgen R matrisinin elde edilmesi;
- Pan görüntünün, GS matrisindeki ilk vektöre (temsili düşük çöz. Pan bandı) göre histogramının eşleştirilmesi;
- GS1 vektörü yerine histogram eşleştirmesi yapılmış Pan görüntünün kullanılarak modifiye edilmiş Q matrisi, üst üçgen R matrisi ile çarpılarak füzyon görüntüsü bandları sütun vektörler olarak elde edilmesi ve eski satır sütun biçimine döndürülmesi.

GS birleştirme süreci Şekil 3.5'te ifade edilmiştir.



Şekil 3.5 : Gram-Schmidt yöntemi.

Şekil 3.5'te ifade edilen yapıya göre öncelikle, Pankromatik görüntü bir bulanıklaştırma süzgeci LPF_{blur} ile iki boyutlu konvolüsyona tabii tutularak P_{blur} elde edilir.

$$P_{blur} = P^{**}LPF_{blur} \tag{3.29}$$

Sonraki işlemde, bulanıklaştırma süzgecinden çıkış olan P_{blur} , satır ve sütun boyunca ölçeği düşürülerek MS görüntü ile aynı ölçeğe getirilerek $\breve{P}_{blur}$ olarak adlandırılsın. Daha sonrasında $\breve{P}_{blur}$ ve MS görüntünün n adet bandı, özgün Pan görüntü ile aynı ölçeğe getirilerek, PCA dönüşümünde olduğu gibi Γ sütun vektörüne evrilerek tek bir A_{GS} matrisinde toplanır.

$$A_{GS} = \left[\Gamma_{\tilde{P}_{blur}} \quad \Gamma_{\breve{M}_1} \quad ... \quad \Gamma_{\breve{M}_n} \right] \tag{3.30}$$

Gram-Schmidt dönüşümü, A_{GS} matrisi üzerinde uygulanacak olursa

$$\begin{aligned} GS &= GST\left\{A_{GS}\right\} \\ GS &= \left[GS_1 \quad GS_2 \quad ... \quad GS_{n+1}\right] \end{aligned} \tag{3.31}$$

n+1 sütun vektöründen oluşan *GS* matrisi elde edilir. Denklem **(3.31)**'de ifade edilen *GS* matrisinin sütunları ortonormaldir; ve dolayısıyla diklik koşullarını sağlar:

$$GS_i^{\,T} GS_j = \begin{cases} 0 \rightarrow i \neq j \\ 1 \rightarrow i = j \end{cases} \tag{3.32}$$

Gram-Schmidt dönüşümü ile orthonormal matris elde edildiği için bu dönüşüm aynı zamanda Gram-Schmidt ortogonalizasyonu olarak da adlandırılmaktır (Strang, 1988). Dönüşümde oluşan sütun vektörlerini hesaplayabilmek için elde edilen sütun vektörlerinin birbirine dik olduğu bir sistem düşünülmelidir. Buna göre A_{GS} matrisinin ilk sütunu $\Gamma_{\tilde{P}_{blur}}$ öncül eksen olarak düşünülecek olursa:

$$GS_1 = \frac{\Gamma_{\tilde{P}_{blur}}}{\left\| \Gamma_{\tilde{P}_{blur}} \right\|} \tag{3.33}$$

birim norma sahip GS_1 elde edilir. Bundan sonra gelen *GS* vektörleri izdüşüm kuralına göre:

$$q_i = \Gamma_{\tilde{M}_i} - \sum_{n=1}^{i} \frac{GS_n^T \Gamma_{\tilde{M}_i}}{GS_n^T GS_n} GS_n$$
$$GS_{i+1} = \frac{q_i}{\|q_i\|}, i = 1, 2, ..., n \quad \textbf{(3.34)}$$

şeklinde elde edilir. Denklem **(3.34)**'de her bir dik ortonormal vektör oluşturulurken öncelikle ilgili Γ vektörünün o ana kadar oluşturulmuş bütün *GS* ortonormal vektörlerine göre izdüşümü hesaplanarak onların toplamından farkı *q* ortogonal vektörü olarak elde edilir ve sonrasında da normalize edilerek yeni *GS* vektörü hesaplanmış olur. A_{GS} matrisi üzerinde uygulanmış olan Gram-Schmidt dönüşümü, dönüşüm sonucunda ortonormal matris oluşturduğu için QR ayrıştırması olarak da bilinen bu yöntemde A_{GS}:

$$A_{GS} = QR$$
$$Q = GS$$
$$A_{GS} = (GS)R \quad \textbf{(3.35)}$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada üst üçgen R matrisini elde etmek için:

$$R = (GS)^{-1} A_{GS} \quad \textbf{(3.36)}$$

GS matrisinin tersi ile A_{GS} çarpılmalıdır. *GS* matrisi ortonormal sütunlardan oluşan bir ortonormal matris olduğu için Denklem **(3.32)**'de verildiği üzere:

$$GS^T GS = I \quad \textbf{(3.37)}$$

transpozu ile kendisinin çarpımı diagonalde 1, diğer noktalarda 0 değerini alacak, yani birim matris *I'yı* oluşturacaktır. *GS* matrisi, tersi ile çarpıldığı durumda birim matris oluşturabilir. Dolayısıyla:

$$GS^{-1} = GS^T \quad \textbf{(3.38)}$$

GS ortonormal matrisinin tersi transpozuna eşit olmaktadır. *R*'nin hesabı Denklem **(3.36)** ve **(3.38)**'den

$$R = (GS)^T A_{GS} \quad \textbf{(3.39)}$$

çıkartılır. Bu ayrıştırmada elde edilen R matrisi ters Gram-Schmidt dönüşümünde (IGST) kullanılarak verinin kayıpsız geri getirilmesini sağlar:

$$A_{GS} = IGST\{GS\} = (GS)R \tag{3.40}$$

Birleştirme işlemi için Gram-Schmidt dönüşümü yapıldıktan sonra yüksek çözünürlüklü Pan görüntü GS matrisinin öncül ekseni GS_1'e göre histogram eşleştirilerek P_{hm}, Γ biçiminde GS matrisinde GS_1'in yerini alır ve yeni matris GS_{mod}:

$$GS_{\text{mod}} = \left[\Gamma_{P_{hm}} \quad GS_2 \quad ... \quad GS_{n+1}\right] \tag{3.41}$$

olarak yeniden düzenlenir. Denklem **(3.40)**'de ifade edilen ters dönüşüm yapısında GS yerine Denklem **(3.41)**'da gösterilmiş olan GS_{mod} kullanılacak olursa:

$$A_{GS,\text{mod}} = IGST\{GS_{\text{mod}}\} = (GS_{\text{mod}})R \tag{3.42}$$

n bandlı birleştirilmiş MS görüntü, $A_{GS,\text{mod}}$ un 2'den (n+1). banda kadar olan sütun vektörlerinin özgün matris biçimine dönmesiyle elde edilir.

3.2.3 Çoklu çözünürlük (süzgeç) yöntemleri

Bu kategoride yer alan yöntemler ilk iki bölümden farklı olarak yüksek çözünürlüklü Pan görüntüden alınan mekansal bilgilerin ağırlıklandırma şeklinde MS görüntüye eklenmesinden ziyade, gerçekleştirilen işlemler frekans veya ölçek bölgesinde gerçekleşmektedir. Bu bölümde yumuşatma süzgeçi bazlı parlaklık modülasyonu (SFIM), yüksek frekans modülasyonu (HFM) ve dalgacık dönüşümü (wavelet) bazlı birleştirme yöntemleri incelenecektir.

3.2.3.1 SFIM birleştirme

Yumuşatma süzgeci bazlı parlaklık modülasyonu yani SFIM, parlaklık modülasyon oranını kullanarak Pan görüntüdeki mekansal detayların MS görüntüye modüle edilmesidir. İşlem matematiksel olarak:

$$\hat{M}_{band} = \tilde{M}_{band}\frac{P}{\tilde{I}} \tag{3.43}$$

şeklinde ifade edilebilir.

Denklem **(3.41)**'de *P*, Pan görüntü; $\tilde{M}_{band}$ ölçeği yükseltilmiş MS görüntü; $\hat{M}_{band}$ birleştirilmiş MS görüntü bandını ifade eder. Parlaklık matrisi $\tilde{I}$, Brovey yönteminde olduğu gibi bandların ortalaması yerine yüksek çözünürlüklü Pan görüntünün yumuşatma süzgecinden geçmiş halidir. Liu (2000)'nun önermiş olduğu yüksek çözünürlüklü Pan görüntüyü yumuşatmak için kullanılacak filtre kerneli şu şekildedir:

$$LPF_{\text{ker}nel} = \frac{1}{r^2}\begin{bmatrix} 1 & 1 & \ldots & 1 \\ 1 & . & . & 1 \\ \ldots & . & . & \ldots \\ 1 & . & \ldots & 1 \end{bmatrix}_{(r,r)} \qquad \textbf{(3.44)}$$

Burada tanımlanan yumuşatma filtre kerneli *LPF* esasında bir alçak geçiren süzgeçtir. (r x r)'lik kare matris olarak tanımlanan bu matriste *r* değeri MS görüntü ile Pan görüntü algılayıcı piksel boyutları oranı olarak tanımlanır. Örnek olarak SPOT 4 uydusunun MS için 20 m. ve Pan için 10 m. olduğu için *r* değeri 2 olarak hesaplanacak; kernel 2x2'lik olacaktır. Buna göre $\tilde{I}$ parlaklık matrisi

$$\tilde{I} = P ** LPF_{\text{ker}nel} \qquad \textbf{(3.45)}$$

Pan görüntü (*P*) ile *LPF*'nin iki boyutlu konvolüsyonundan elde edilir.

3.2.3.2 HFM birleştirme

Yüksek frekans modülasyonu (HFM) yönteminde, yüksek mekansal çözünürlüklü Pan görüntüsü MS görüntünün her bir bandıyla çarpılarak alçak geçiren süzgeçten geçmiş Pan görüntüyle normalize edilir.

$$\hat{M}_{band} = \tilde{M}_{band}\frac{P}{P_{LPF}} \qquad \textbf{(3.46)}$$

Bu denklemde *P*, Pan görüntü; $\tilde{M}_{band}$ ölçeği yükseltilmiş MS görüntü; $\hat{M}_{band}$ birleştirilmiş MS görüntü bandını ifade eder. P_{LPF} ise alçak geçiren süzgeçten geçmiş Pan görüntüsüdür.

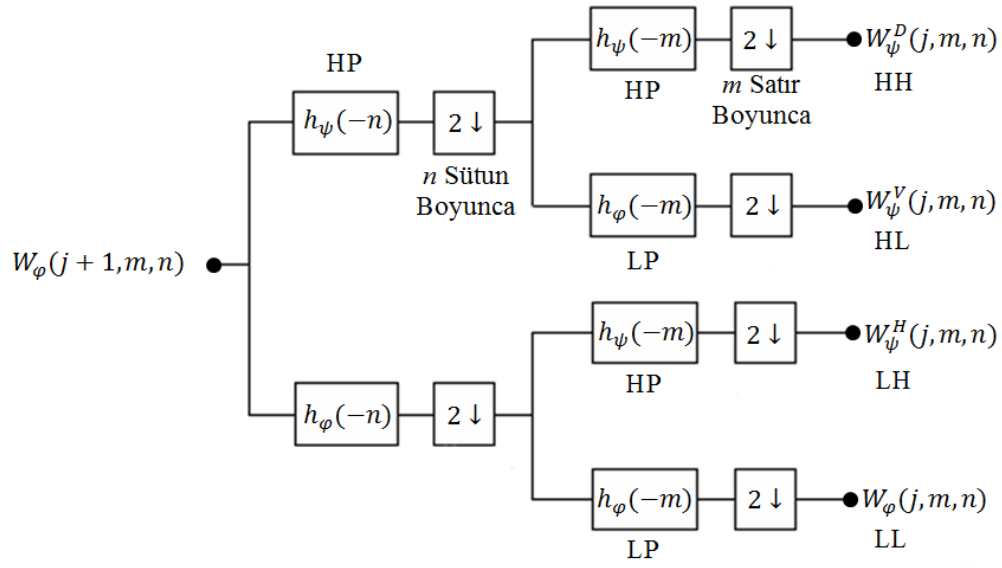
$$P_{LPF} = P ** LPF_{\text{ker}nel} \qquad \textbf{(3.47)}$$

Burada *LPF* alçak geçiren filtre kernelini ifade etmektedir. Bu filtre, SFIM'de olduğu gibi belirli bir boyut kısıtlamasına tabii değildir.

3.2.3.3 Dalgacık dönüşümü

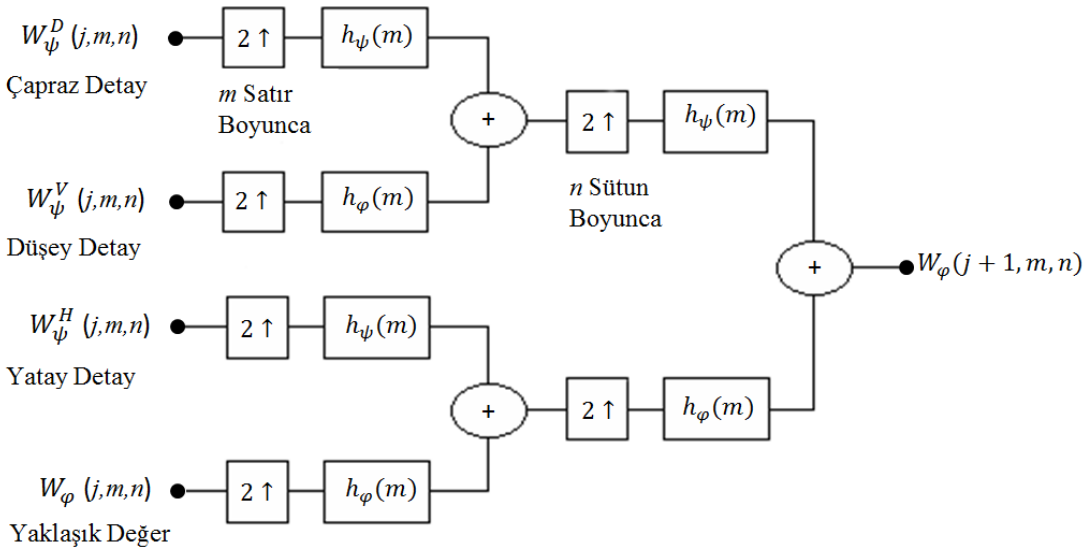
Ayrık Dalgacık Dönüşümü (Discrete Wavelet Transform), 1980'lerin sonlarına doğru Stéphene Mallat'ın yapmış olduğu araştırmalarla birlikte çeşitli disiplinlerde yaygınlık kazanmış, sinyal işlemede sıkıştırma, hedef tanıma gibi çeşitli analizlerde kullanılan bir yöntemdir. Dalgacık dönüşümü, yerel değişimleri olan verileri etkin bir şekilde ifade edebilmektedir. Fourier yapısıyla karşılaştırıldığı zaman örnek olarak birim basamak fonksiyonu Fourier serisinde Gibbs olayı olarak da bilinen sorun nedeniyle sonsuz terimin süperpozisyonu şekilde ifade edilmesine karşın wavelet bölgesinde kullanılan kernel yardımıyla aynı veri bir kaç terim ile ifade edilebilir.

Dalgacık analizi için ikili; sentezi için ikili, yani toplam dört adet FIR filtre kullanılmakta olup bu filtreler, dörtlü yansıtım filtresi (kernel) olarak adlandırılırlar. İki boyutlu veri kümesi üzerinde analiz yapmak için ayrılabilir fonksiyonlardan yararlanarak her bir boyut doğrultusunda sıradan analiz filtrelerinden geçirilerek işlem yapılır. Dalgacık analizi (dalgacık dönüşümü) için örnek olarak (m x n) boyutlu bir matriste önce n adet sütun boyunca analiz filtreleri uygulanp iki örnekte bir veri alındıktan sonra, m adet satır boyunca, aynı analiz filtreleri uygulanıp iki örnekte bir veri alınır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 : İki boyutlu matris için dalgacık analizi.

Burada elde edilen dört bileşenden LL, yaklaşık değeri; LH, yatay detayı; HL, dikey detayı ve HH çapraz detayı ifade eder. Giriş verisinin ayrıldığı bu dört bileşenden kayıpsız olarak tekrar geri getirilebilmesi için dalgacık sentezi (ters dalgacık dönüşümü) uygulanır. Sentez işleminde bu sefer öncelikle ayrıştırılmış verilere önce m adet satır boyunca (verinin satır uzunluğu iki kat olacak şekilde) sıfır ekleme yapılarak analiz filtrelerinin yansıtılmış sentez filtreleri kullanılır ve sonrasında da n adet sütun boyunca sıfır ekleme yapılarak sentez filtresinden geçirilir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 : İki boyutlu matris için dalgacık sentezi.

Nunez ve diğ. (1999) ve sonrasında Pajares ve Cruz'a (2004) göre, çoklu çözünürlük analizi kapsamında Pan ve MS görüntülerin alçak ve yüksek frekans değerlerini ayırarak ve sonrasında sentez kısmı için uygun bir kombinasyon kurularak görüntü birleştirme sağlanabilmektedir.

Dalgacık dönüşümü değişim yöntemi

Nunez ve diğ. (1999), bu yöntemin gerçeklenmesi için gerekli işlemleri şu şekilde belirtmişlerdir:

- MS görüntünün ölçeğinin büyütülmesi;
- Ölçeği büyütülmüş MS görüntü bantlarından parlaklık matrisinin (I) hesaplanması;
- Pan görüntünün parlaklık matrisi ile histogramının eşleştirilmesi;
- Histogramı eşleştirilmiş pan görüntünün iki boyutlu dalgacık analizinin yapılması;

- Multispektral görüntünün iki boyutlu dalgacık analizinin yapılması;
- Multispektral görüntünün dalgacık analizinde yüksek frekansı ifade eden detay bilgilerinin pan görüntüdeki detay bilgiler ile değiştirilmesi;
- Dalgacık analizi yapılmış ve detay bilgisi değiştirilmiş veriden ters dalgacık dönüşümü ile birleştirilmiş görüntünün elde edilmesi.

Dalgacık dönüşümü toplama yöntemi I

Nunez ve diğ. (1999), tarafından ifade edilen yöntem şu şekildedir:

- MS görüntünün ölçeğinin büyütülmesi;
- Ölçeği büyütülmüş MS görüntü bantlarından parlaklık matrisinin (*I*) hesaplanması;
- Pan görüntünün parlaklık matrisi ile histogramının eşleştirilmesi;
- Histogramı eşleştirilmiş pan görüntünün iki boyutlu dalgacık analizinin yapılması;
- MS görüntünün iki boyutlu dalgacık analizinin yapılması;
- MS görüntünün dalgacık analizinde yüksek frekansı ifade eden detay bilgilerinin pan görüntüdeki detay bilgiler ile toplanması;
- Ters dalgacık dönüşümü ile birleştirilmiş görüntünün elde edilmesi.

Dalgacık dönüşümü toplama yöntemi II

Nunez ve diğ. (1999), tarafından ifade edilen ikinci toplama yönteminde işlem basamakları bir önceki yöntem ile aynı şekilde olup sadece ek olarak MS görüntünün dalgacık analizinde yaklaşık değeri ile ölçeği büyütülmemiş görüntünün değiştirilmesi sonucunda ters dalgacık dönüşümü alınmaktadır.

Dalgacık dönüşümü katsayı yöntemi I

Pajares ve Cruz'un (2004) ifade etmiş olduğu yöntemlerin ilkinin işlem sırası şu şekildedir:

- MS görüntünün ölçeğinin büyütülmesi;
- Pan görüntünün, MS görüntünün her bandı ile histogramının eşleştirilmesi;
- MS ve eşleştirimiş Pan görüntünün ilgili bant için dalgacık analizinin yapılması;

- MS görüntüde yaklaşık değer yerine, ms görüntünün tanımlı bir "r" katının konulması (r değeri ms görüntü ile pan görüntü piksel boyutları oranıdır) ve ms ile pan detay bilgilerinin toplanması;
- Ters dalgacık dönüşümü ile birleştirilmiş görüntünün elde edilmesi.

Dalgacık dönüşümü katsayı yöntemi II

Pajares ve Cruz'un (2004) önerdiği ikinci yöntem ilk yöntemden farklı olarak dalgacık analizinde ms görüntünün detay bilgisi ile pan görüntünün detay bilgisinin değiştirilmesi sonucunda ters dalgacık dönüşümü yapılarak birleştirilmiş görüntü elde edilir.

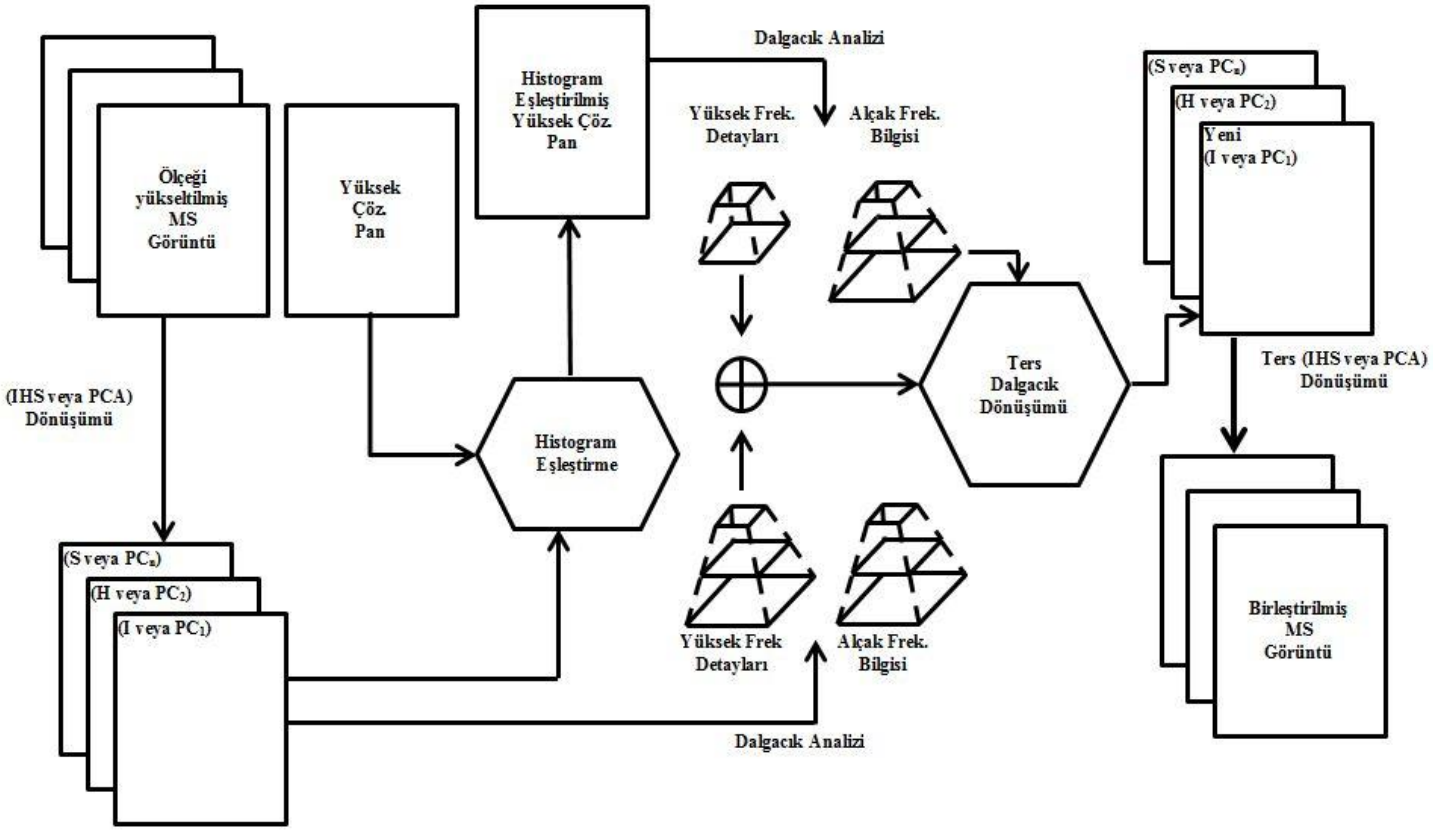
Dalgacık dönüşümü katsayı yöntemi III

Pajares ve Cruz'un (2004) ifade etmiş olduğu son yöntemde ilk iki yöntemden farklı olarak dalgacık analizinde ms görüntünün detay bilgisi değiştirilmeden ters dalgacık dönüşümü uygulanmaktadır.

3.2.4 Karma yöntemler

Gonzales ve diğ. (2004), bileşen değişim ve dalgacık dönüşümü yöntemini birleştirme konusunda araştırmalar gerçekleştirmiş olup, yapmış oldukları akademik çalışmada PCA ve IHS yöntemini dalgacık analizi ile birleştirerek sonuç görüntüleri elde etmişlerdir (Şekil 3.8). Yöntem basamakları şu şekildedir :

- MS görüntünün ölçeğinin büyütülmesi;
- IHS veya PCA dönüşümünün uygulanması;
- Pan görüntünün, parlaklık matrisi *I* veya en yüksek değerli özvektör (ilk temel bileşen) referans alınarak histogramının eşleştirilmesi;
- *I* veya ilk temel bileşene iki boyutlu dalgacık dönüşümü uygulanması;
- Histogramı eşleştirilmiş pan görüntüye iki boyutlu dalgacık dönüşümü uygulanması;
- Pan görüntüden çıkartılan detay bilgileri, *I* veya ilk temel bileşenden çıkartılan detay bilgilerine eklenerek ters dalgacık dönüşümü uygulanması;
- Ters IHS veya ters PCA dönüşümü ile birleştirilmiş görüntünün elde edilmesi.



Şekil 3.8 : IHS/PCA ile dalgacık kullanılan birleştirme yöntemi.

3.3 Birleştirme Kalite Değerlendirme Yöntemleri

Birleştirme işlemlerinin uygulanması sonucunda elde edilen görüntülerin kalitesinin, belli bir yönteme bağlı olarak belirlenmesi, uygulanan modellerin karşılaştırılması açısından önem arzetmektedir. Görüntü birleştirme topluluğu tarafından karşılaştırmada standart olarak kabul görmüş yöntemler aşağıda ifade edilmektedir.

3.3.1 SAM

Spectral Angle Mapper (Spektral Açı Eşleştiricisi) yöntemi ile birleştirilmiş görüntü ve referans görüntü bandları spektral vektörleri arasındaki açı hesaplanarak spektral bozulma tespit edilir. İdeal değeri sıfır olan bu yöntem için hesaplama sonucu ne kadar büyük çıkarsa birleştirilmiş görüntünün spektral kalitesi o kadar düşük olur.

$$SAM(i) = \arccos\left(\frac{\left\langle \hat{M}_i, M_i \right\rangle}{\left\|\hat{M}_i\right\|\left\|M_i\right\|}\right) \tag{3.48}$$

$\hat{M}$ birleştirilmiş görüntüyü; M referans görüntüyü, i bandı temsil etmektedir.

3.3.2 RMSE

Root Mean Square Error (Karesel Ortalama Hata), her bir bandın referans görüntüsü ile birleştirilmiş görüntüsü arasındaki ortalama fark

$$RMSE(i) = \frac{1}{tP}\sqrt{\sum_{k=1}^{tP}\left(M_i(k) - \hat{M}_i(k)\right)^2}, i = 1,2...,n \tag{3.49}$$

şeklindedir. Bu denklemde *tP*, toplam piksel sayısını, i bandı ifade etmektedir.

3.3.3 RASE

Ranchin (1999), RMSE denklemi üzerinden bir geliştirme yaparak Relative Average Spectral Error (Göreceli Ortalama Spektral Hata) ifadesini

$$RASE = 100\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{RMSE^2(i)}{E\left(M_i\right)}\right)} \tag{3.50}$$

şeklinde tanımlamıştır. Burada *i* bandı, RMSE karesel ortalama hatayı, *E*() operatörü beklenen değeri (yani ilgili MS bandın ortalamasını) ifade etmektedir.

3.3.4 ERGAS

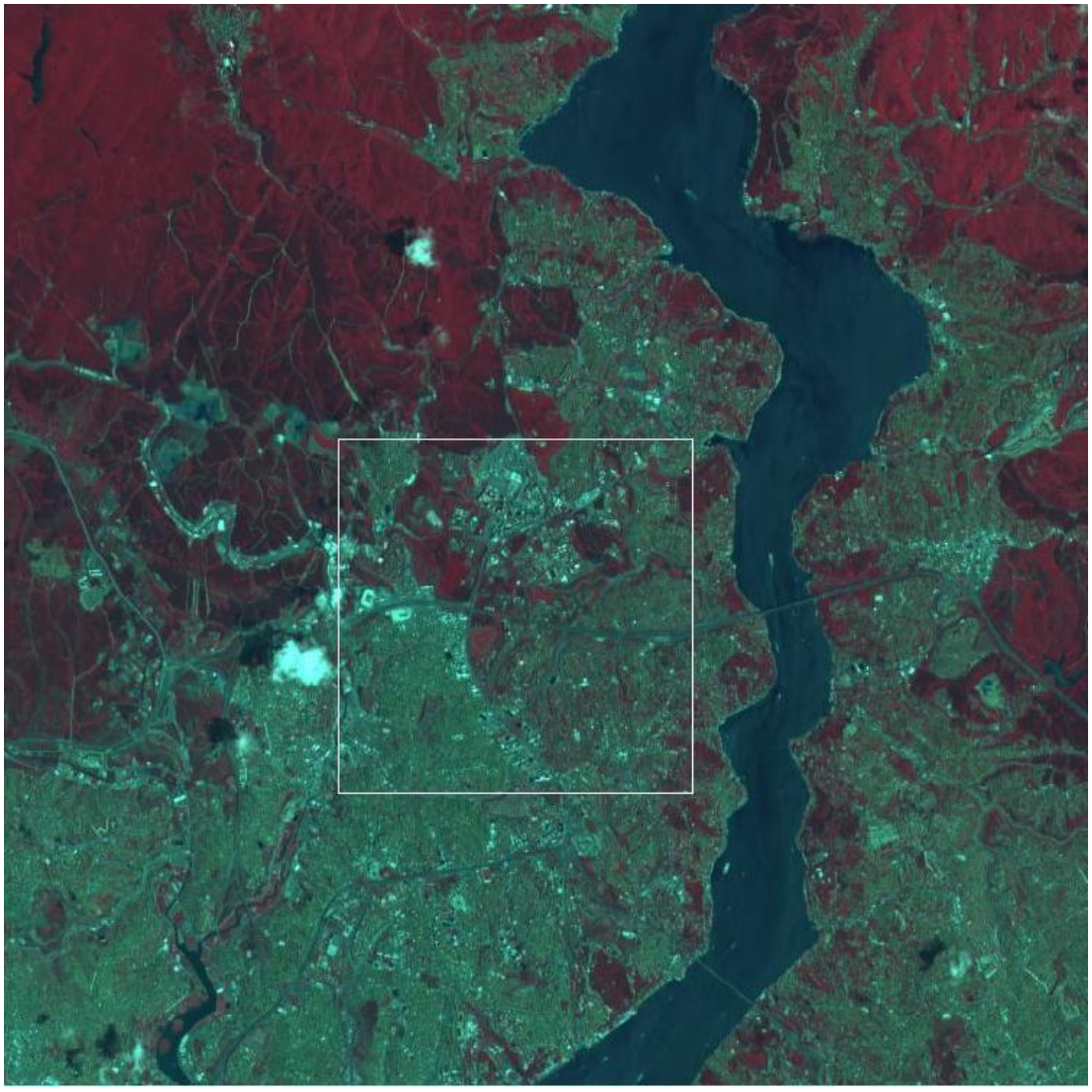
Wald (2002), RASE denklemine Pan/MS görüntü çözünürlük oranlarını ve paydaya beklenen değerin kendisi yerine karesini ekleyerek ERGAS (Erreur Relative Globale Adimensionelle de Synthèse – Göreceli Boyutsuz Global Sentez Hatası) denklemini

$$ERGAS = 100\frac{h}{l}\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{RMSE^2(i)}{E^2\left(M_i\right)}\right)} \qquad \textbf{(3.51)}$$

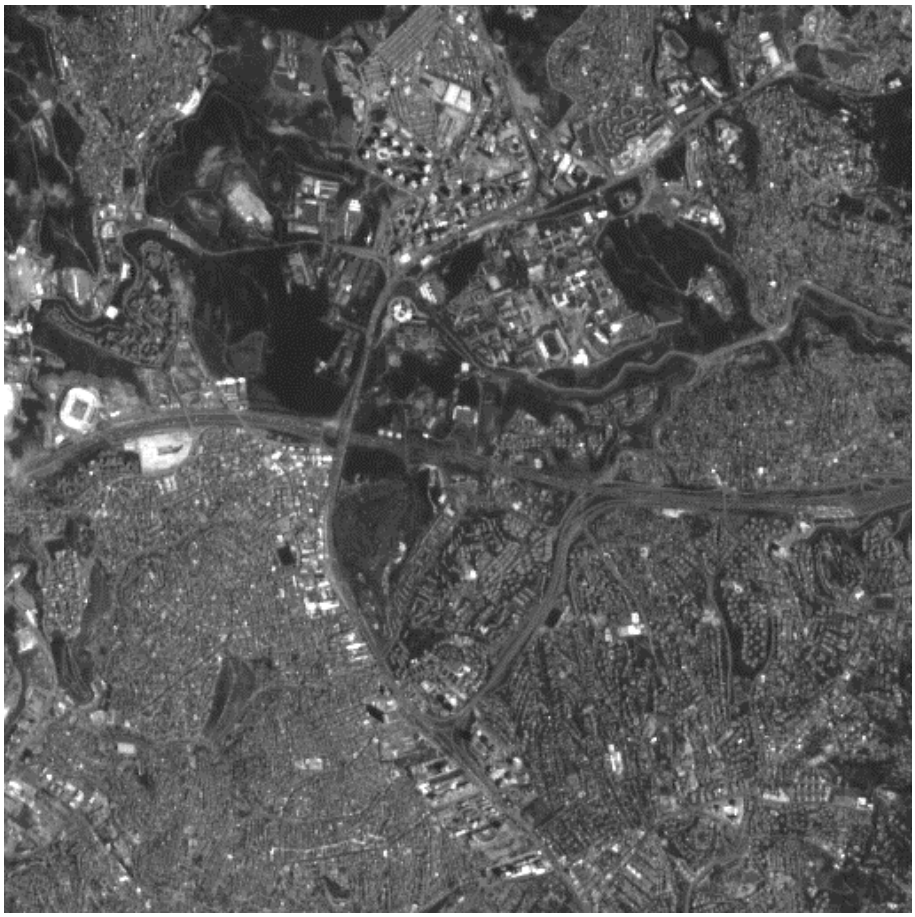
şeklinde ifade etmiştir. Denklem **(3.51)**'de h Pan görüntünün çözünürlüğünü, l MS görüntünün çözünürlüğünü, RMSE karesel ortalama hatayı, *E*() beklenen değeri ifade etmektedir.

4. TEST SONUÇLARI

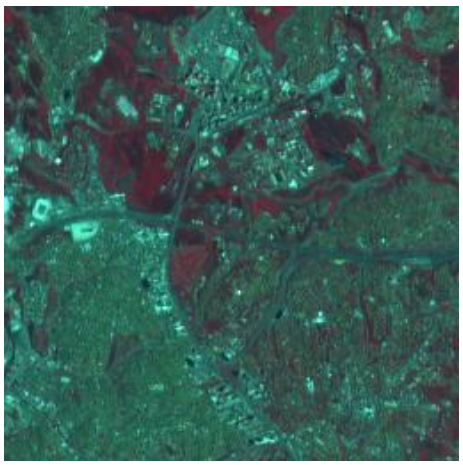
Çalışmanın gerçekleştirildiği giriş görüntüleri 11 Haziran 2010 tarihli SPOT 4 uydu geçişinde kaydedilmiş olan İstanbul Maslak Finansal Bölgesi'ni (Şekil 4.1) içeren Pan (Şekil 4.2) ve MS (Şekil 4.3) görüntüleridir.



Şekil 4.1 : Çalışmanın gerçekleştirildiği bölge.



Şekil 4.2 : Yüksek uzamsal çözünürlüklü Pan görüntü.



Şekil 4.3 : Düşük uzamsal çözünürlüklü MS görüntü.

Bu giriş görüntüleri kullanılarak yapılmış olan çalışmada 14 farklı model incelenmiştir. Bu modellerin uygulanması sonucuda oluşan birleştirilmiş görüntüler, TSO sisteminde üretilmiş olan referans görüntüsü ile birlikte ayrı ayrı karşılaştırılacak şekilde birleştirme kalite değerlendirme yöntemlerine tabi tutulmuş

olup bu yöntemlerden SAM Çizelge 4.1'de, RMSE 4.2'de, RASE ve ERGAS 4.3'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.1 : SAM yöntemiyle birleştirme kalitesi değerlendirme.

Yöntem	B1	B2	B3
Brovey	13.9435	6.1248	9.7060
IHS	11.3348	**4.2461**	6.4284
PCA	12.1819	5.1213	4.6806
GS	6.1907	5.6210	5.6129
SFIM	7.0216	6.5597	6.9111
HFM	5.2598	5.3177	3.9328
Wavelet_S	5.4977	6.5241	3.5400
Wavelet_A (1)	6.5182	6.4446	3.4954
Wavelet_A (2)	6.3518	6.7041	3.2058
Wavelet_C (1)	5.1691	6.5971	3.0860
Wavelet_C (2)	5.3049	6.7855	3.2601
Wavelet_C (3)	**4.1350**	6.2313	**2.7557**
IHS + Wavelet	5.1293	6.6641	3.5059
PCA + Wavelet	4.7378	6.9564	4.8265

Çizelge 4.2 : RMSE yöntemiyle birleştirme kalitesi değerlendirme.

Yöntem	B1	B2	B3
Brovey	0.032753	0.053931	0.052029
IHS	0.021193	**0.013868**	0.018847
PCA	0.022435	0.016666	0.013682
GS	0.011524	0.018313	0.016410
SFIM	0.013100	0.021406	0.020238
HFM	0.009746	0.017382	0.011522
Wavelet_S	0.010190	0.021208	0.010371
Wavelet_A (1)	0.012096	0.020967	0.010223
Wavelet_A (2)	0.011814	0.021851	0.009375
Wavelet_C (1)	0.009601	0.021556	0.009030
Wavelet_C (2)	0.009854	0.022082	0.009563
Wavelet_C (3)	**0.007673**	0.020306	**0.008061**
IHS + Wavelet	0.009506	6.6641	0.010267
PCA + Wavelet	0.008773	6.9564	0.014113

Çizelge 4.3 : RASE ve ERGAS yöntemiyle birleştirme kalitesi değerlendirme.

Yöntem	RASE	ERGAS
Brovey	0.53320	0.030786
IHS	0.22301	0.014027
PCA	0.22254	0.014181
GS	0.17784	0.010333
SFIM	0.21041	0.012167
HFM	0.15002	0.008685
Wavelet_S	0.16585	0.009493
Wavelet_A (1)	0.17228	0.010670
Wavelet_A (2)	0.17317	0.010059
Wavelet_C (1)	0.16208	0.009219
Wavelet_C (2)	0.16676	0.009485
Wavelet_C (3)	**0.14687**	**0.008228**
IHS + Wavelet	0.16522	0.009374
PCA + Wavelet	0.17827	0.009980

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Hesaplama yöntemlerinin birleştirme kalitesi SAM, RMSE, RASE, ERGAS denklemlerine göre hesaplanmış olup bu denklemlerde en düşük sonucu veren yöntem en iyi olarak ifade edilmektedir. Buna göre genel değerlendirmede en iyi sonuç veren yöntem "dalgacık dönüşümü katsayı yöntemi III" olmuştur.

Gelişen uydu teknolojisine paralel olarak görüntü birleştirme topluluğunun, bugüne kadar geliştirmiş olduğu yöntemler daha yüksek çözünürlük seviyesinde aynı başarımı sağlayamayabilir. Landsat uydusu üzerinde ilk olarak geliştirilmiş Brovey yönteminden günümüz uyduları üzerinde uygulanan dalgacık dönüşümü yöntemine doğru gelişim sergilenmiş olup bu yeni uydular için de güncel yöntemlerin aynı başarımı sağlayamaması beklenmektedir. Bunun için de yöntemler içerisinde ek özellik geliştirme çalışmaları ve değişik yöntem arayışları halen süregelmektedir.

Çalışmayla ilgili olarak karşılaşılan sorunlardan en önemlisi uydu görüntülerinin megapiksel seviyesinde çok yüksek boyutlu olması nedeniyle 32/64bit mimari üzerinde çalışan programlarla yapılan görüntü işlemenin, gerçekleşme süresi bakımından, oldukça yavaş olmasıdır. Bu nedenle çalışmaların Yüksek Başarımlı Hesaplama (HPC) sistemleri üzerinde bilgisayar kümeleri, çoklu-çekirdek işlemcili sunucular veya ekran kartı programlama sistemleri (Tesla, Fermi, vb.) üzerinden programlama ile yöntemlerin daha hızlı gerçekleştirilmesi sağlanabilir.

KAYNAKLAR

Blanchet, C. (2008). *Spot On Terminal: Operations Manual.* Toulouse, France, EADS DS.

Chavez, P. S., Stuart, J., Sides, C. ve Anderson, J. A. (1991). Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: *Landsat TM and SPOT panchromatic, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 57, (Sf. 259–303).

Collet, C., Chanussot, J., ve Chehdi, K. (2009). Multivariate Image Processing. Hoboken, New Jersey, Wiley.

Gonzales, M., Saleta, J. L., Catalan, R.G. ve Garcia, R. (2004). " Fusion of multispectral and panchromatic images using improved IHS and PCA mergers based on wavelet decomposition", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, (Sf. 1291–1299).

Gillespie, A. R., Kahle, A. B. ve Walker, R. E. (1987). Color Enhancement of Highly Correlated Images-II. Channel Ratio and "Chromaticity" Transform Techniques, *Remote Sensing of Environment*, vol. 22, (Sf. 343-365).

Laben, C. A. ve Brower B. V. (2000). Process for Enhancing The Resolution of Multispectral Imagery Using Pan-Sharpening, United States Patent, patent number: 6011875.

Liu, J. G. (2000). Smoothing Filter Based Intensity Modulation: *A spectral preserve image fusion technique for improving spatial details*, International Journal of Remote Sensing, vol. 21, (Sf. 3461–3472).

Mallat, S. (1989). "A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation" *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* vol.11 no : 7 (Sf. 674-693).

Núnez, J., Otazu, X., Fors, O., Prades, A., Palà, V. ve Arbiol R. (1999). Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, (Sf. 1204–1211).

Pajares, G. ve Cruz, J. M. (2004) "A wavelet-based image fusion tutorial" The Journal of Pattern Recognition Society, Pergamon (Sf. 1855 – 1872).

Prasad, L. ve Iyengar, S. S. (1997)**.** Wavelet Analysis with Applications to Image Processing. Boca- Raton, New York, CRC Press.

Ranchin, T., Wald, L. (1999). "Fusion of high spatial and spectral resolution images" Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 66, num. 1 (Sf. 49-61).

Schowengerdt, R. A. (2007). *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing.* San Diego, California, AP.

Stathaki, T. (2008). *Image Fusion: Algorithms and Applications*. Amsterdam, Netherlands, AP.

Strang, G. (1988). Linear Algebra And Its Applications. Sea Harbor Drive Orlando, FL, Harcourt.

Turk, M. ve Pentland, A. (1991), "Eigenfaces for Recognition", J. Cognitive Neuroscience, vol. 3, (Sf. 71-86).

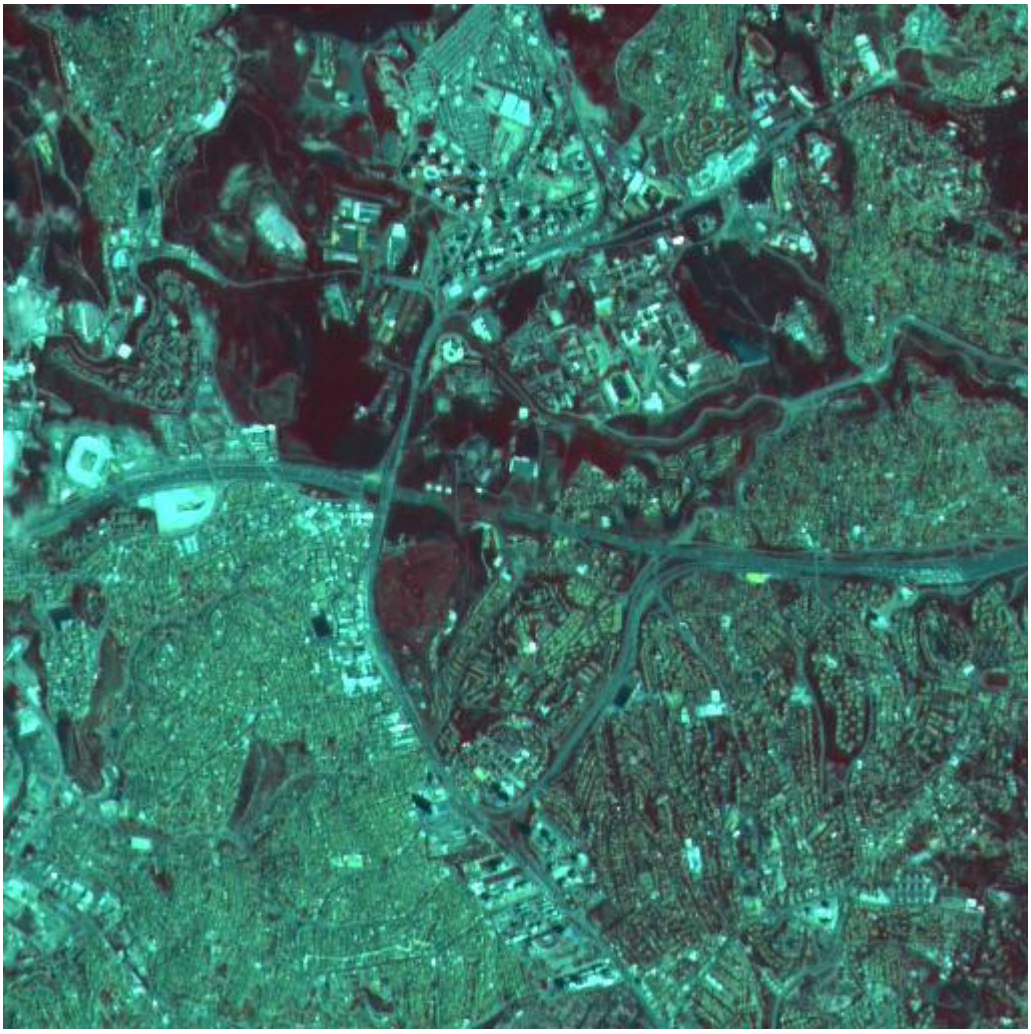
Wald, L. (2002). *Data Fusion : Definitions and Architectures : Fusion of Images of Different Spatial Resolutions*, ENSMP.

Zhang, L., Liao, M., Wang, Y., Lu, L. ve Wang, Y. (2004). Robust approach to the MAD change detection method, Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology IV, vol. 5574, (Sf. 184–193).

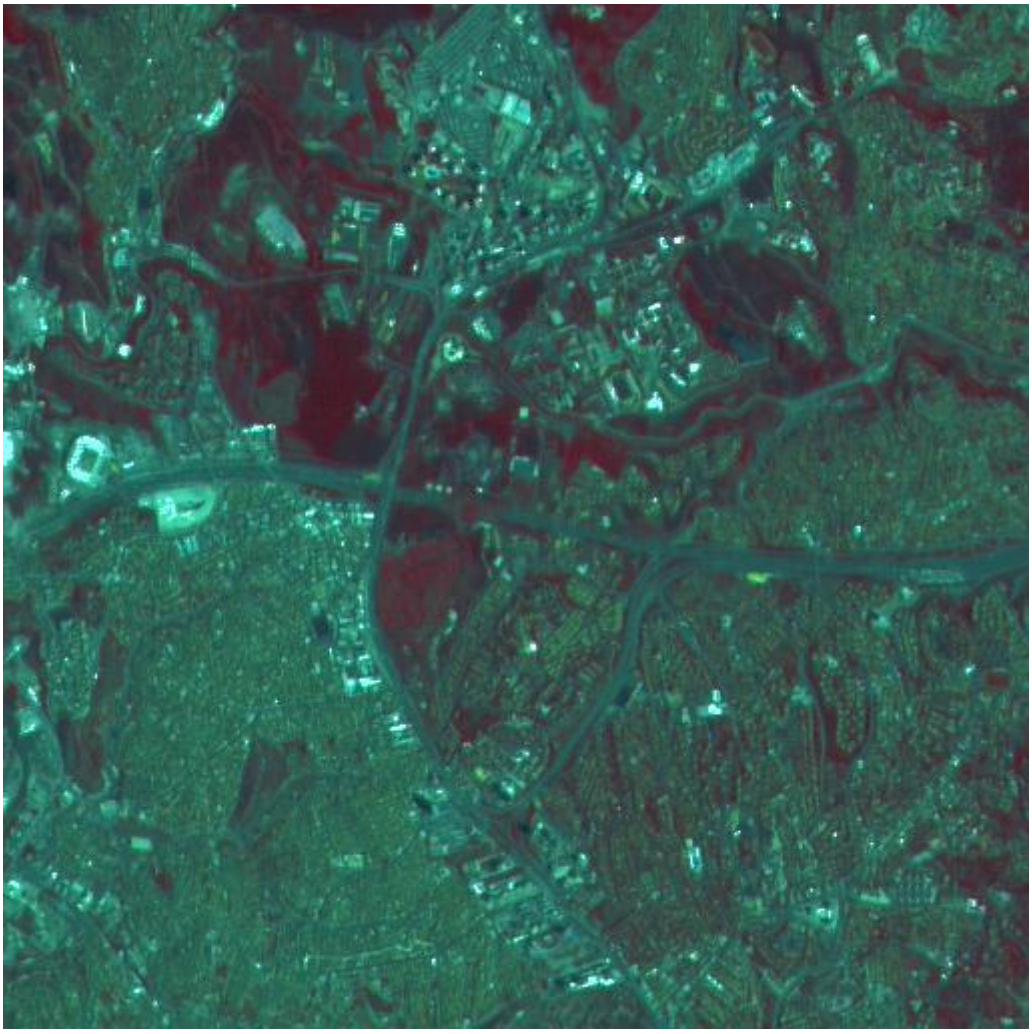
EKLER

EK A: Birleştirilen Görüntüler

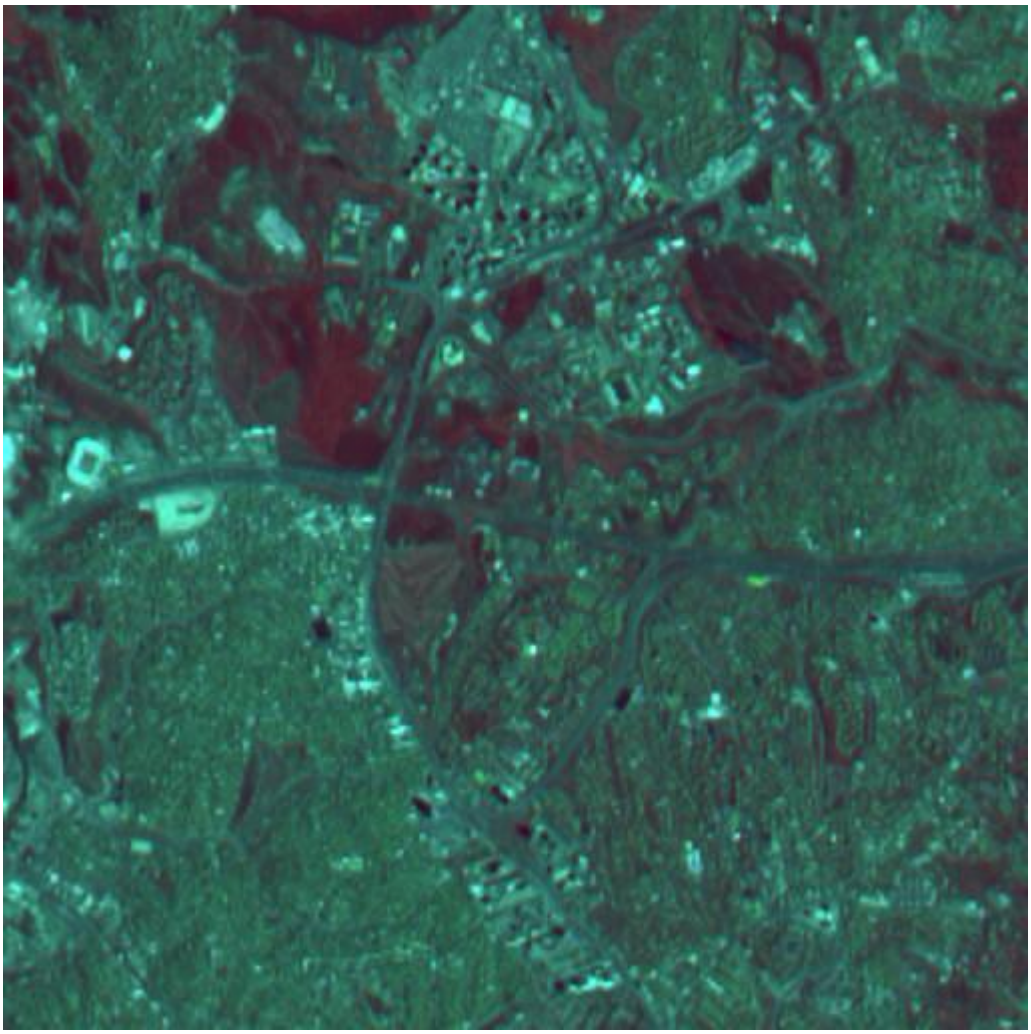
EK A



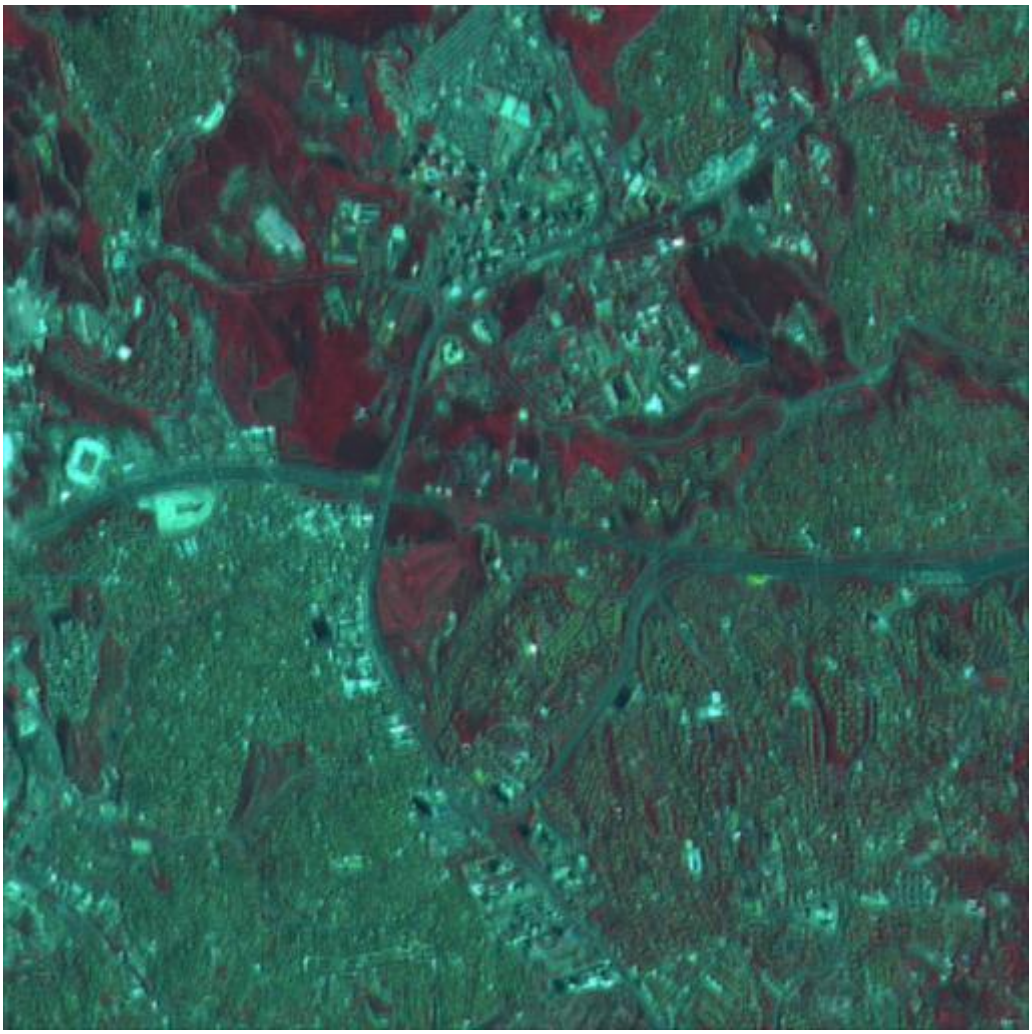
Şekil A.1 : Brovey yöntemi ile birleştirilmiş görüntü.



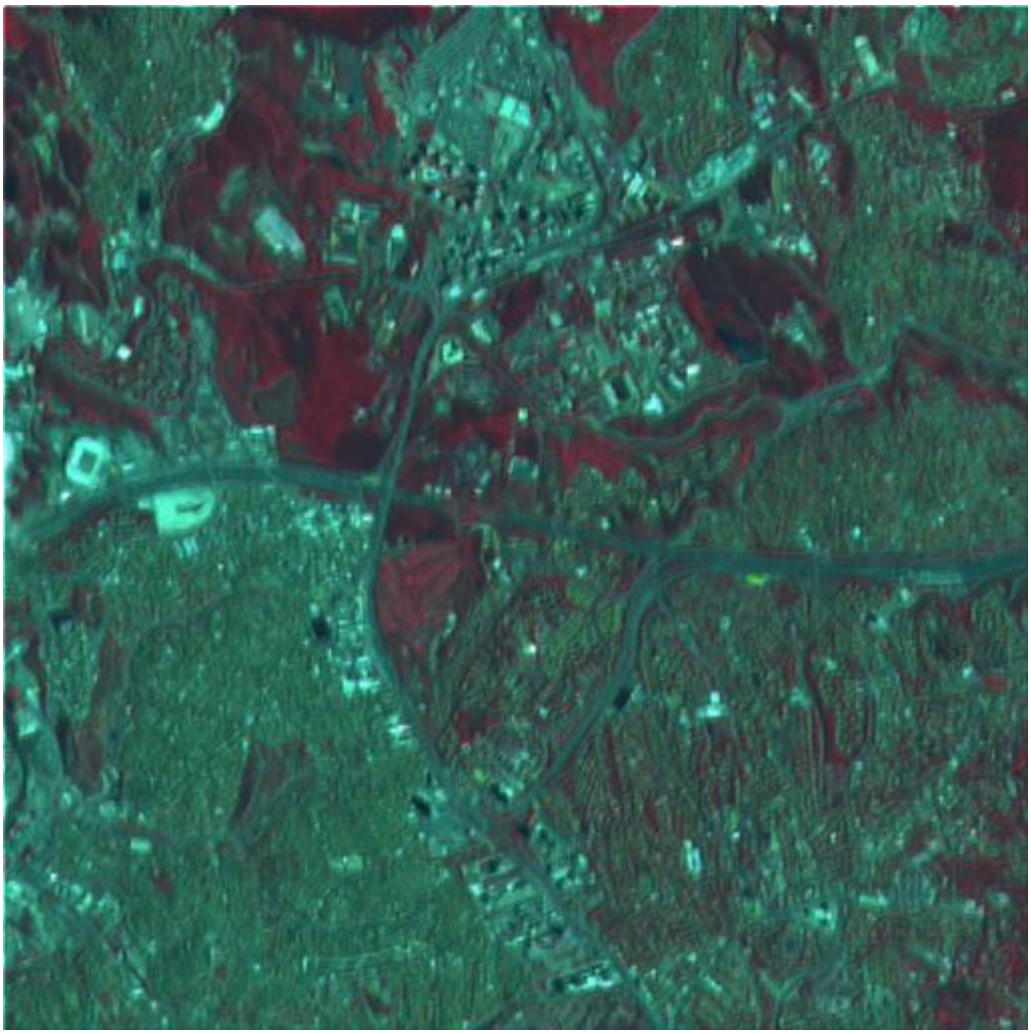
Şekil A.2 : IHS yöntemi ile birleştirilmiş görüntü.



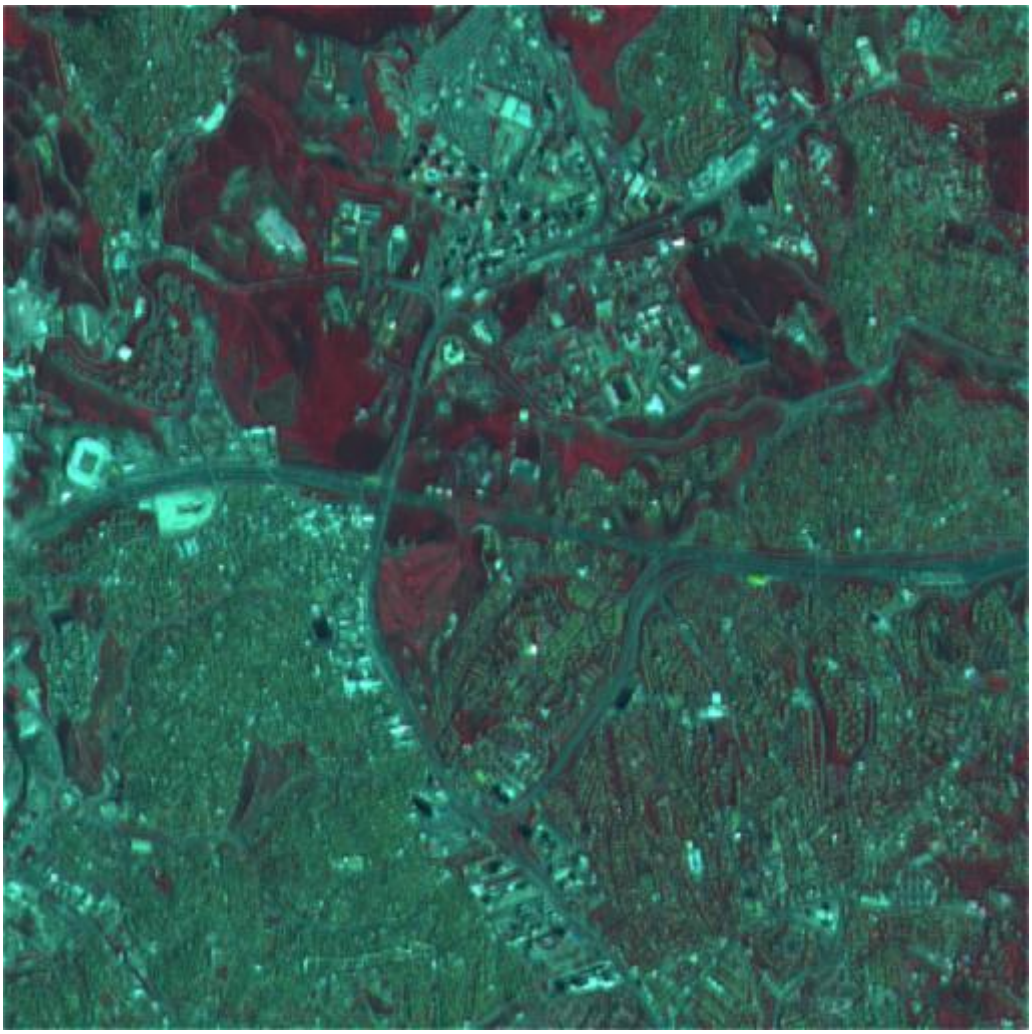
Şekil A.3 : PCA yöntemi ile birleştirilmiş görüntü.



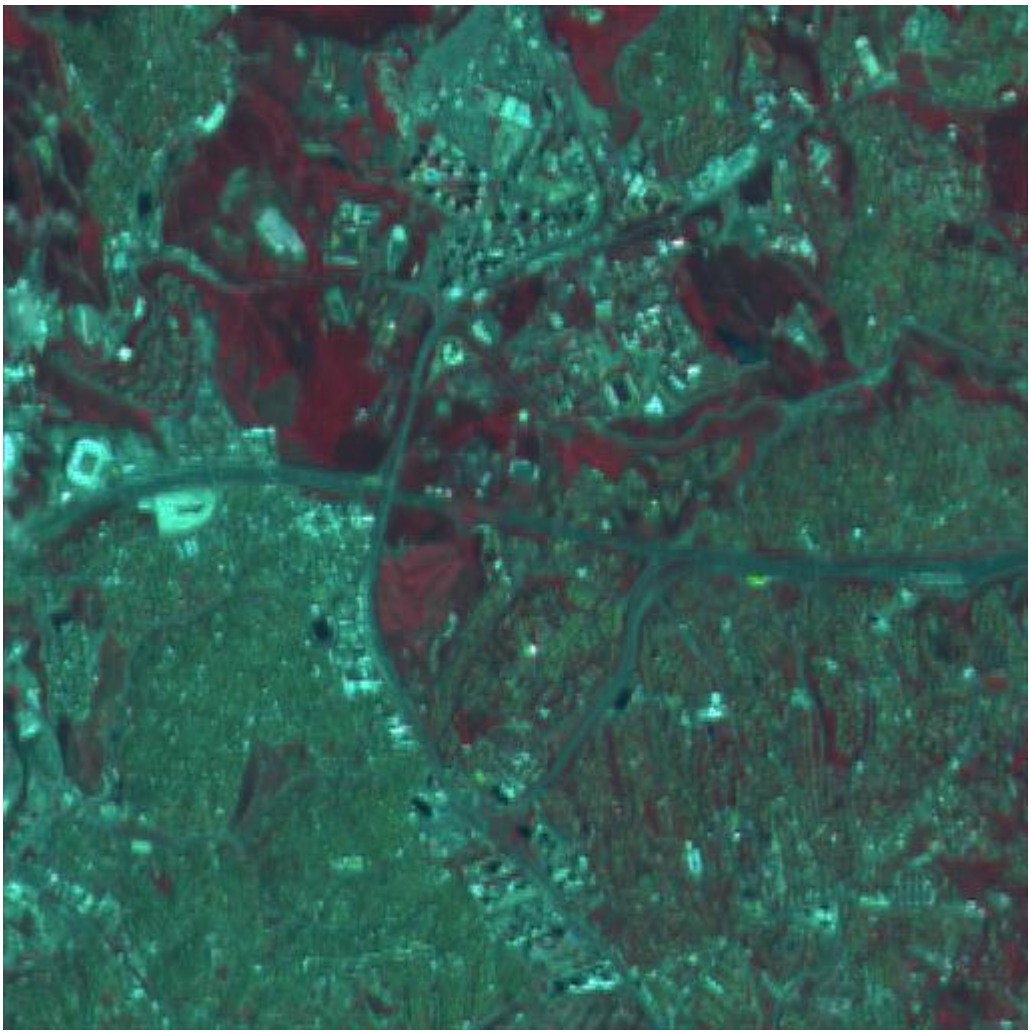
Şekil A.4 : Gram-Schmidt yöntemi ile birleştirilmiş görüntü.



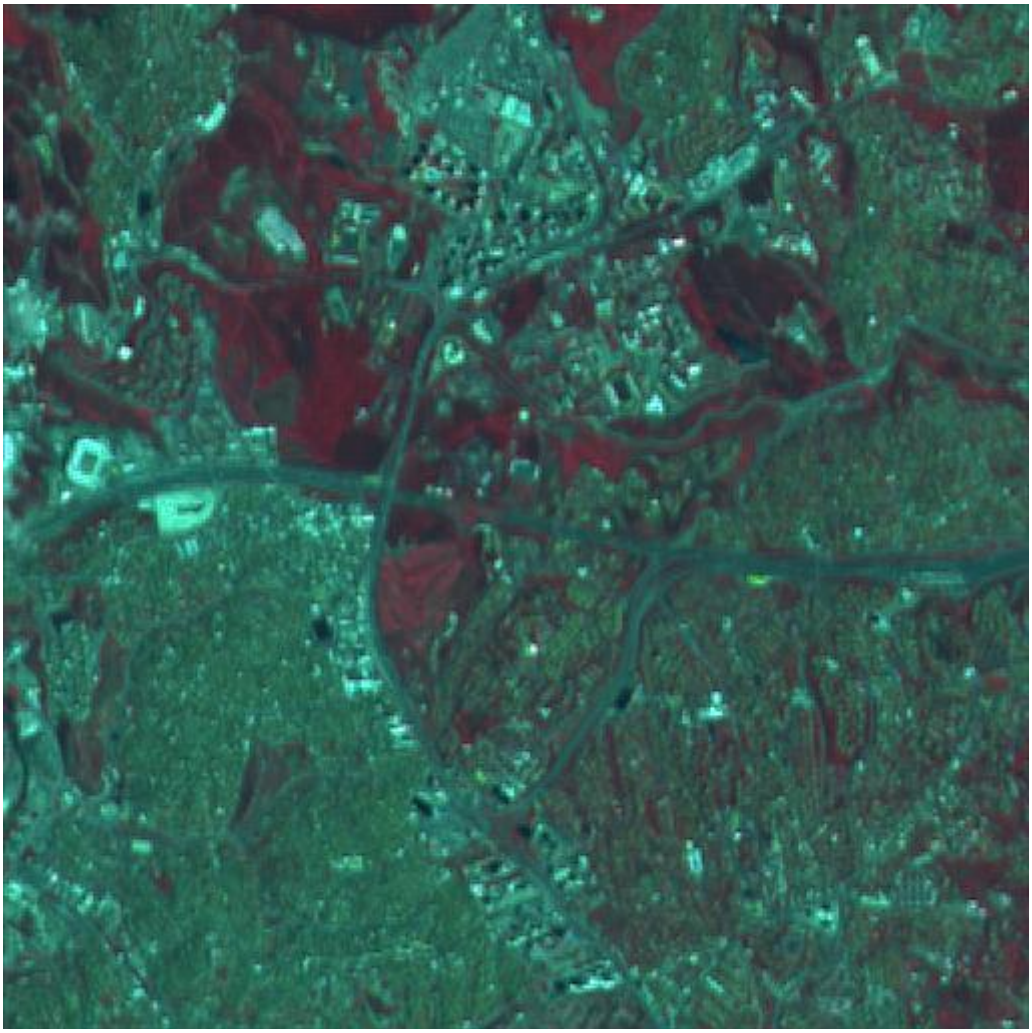
Şekil A.5 : SFIM yöntemi ile birleştirilmiş görüntü.



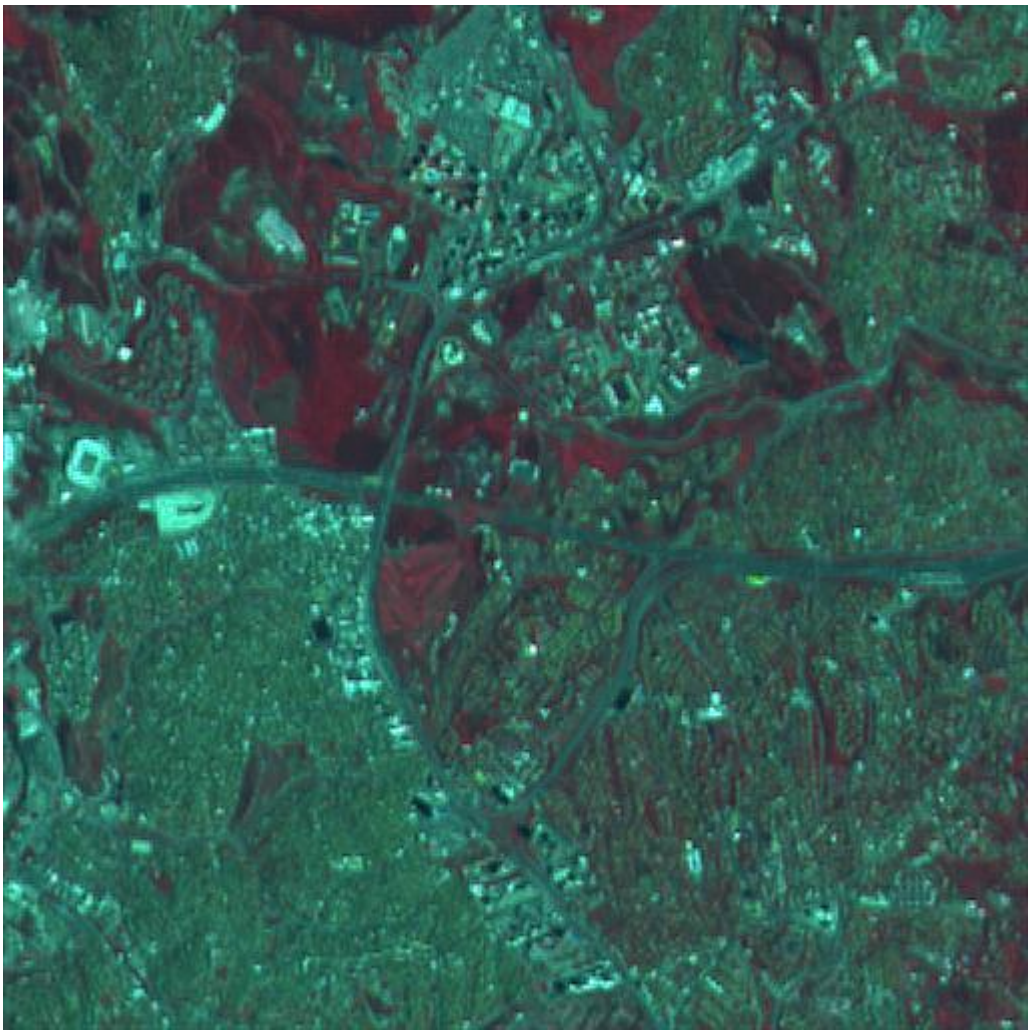
Şekil A.6 : HFM yöntemi ile birleştirilmiş görüntü.



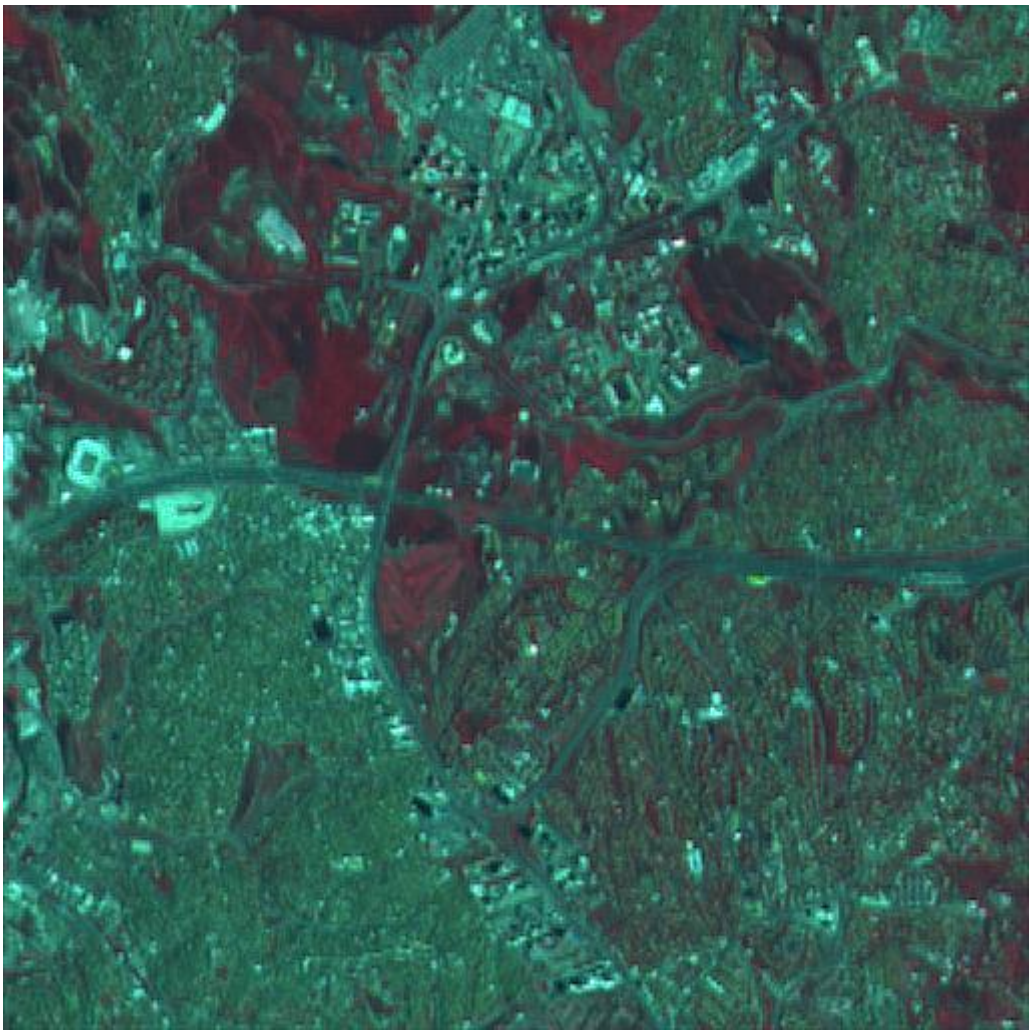
Şekil A.7 : Dalgacık dönüşümü değişim yöntemi ile birleştirilmiş görüntü.



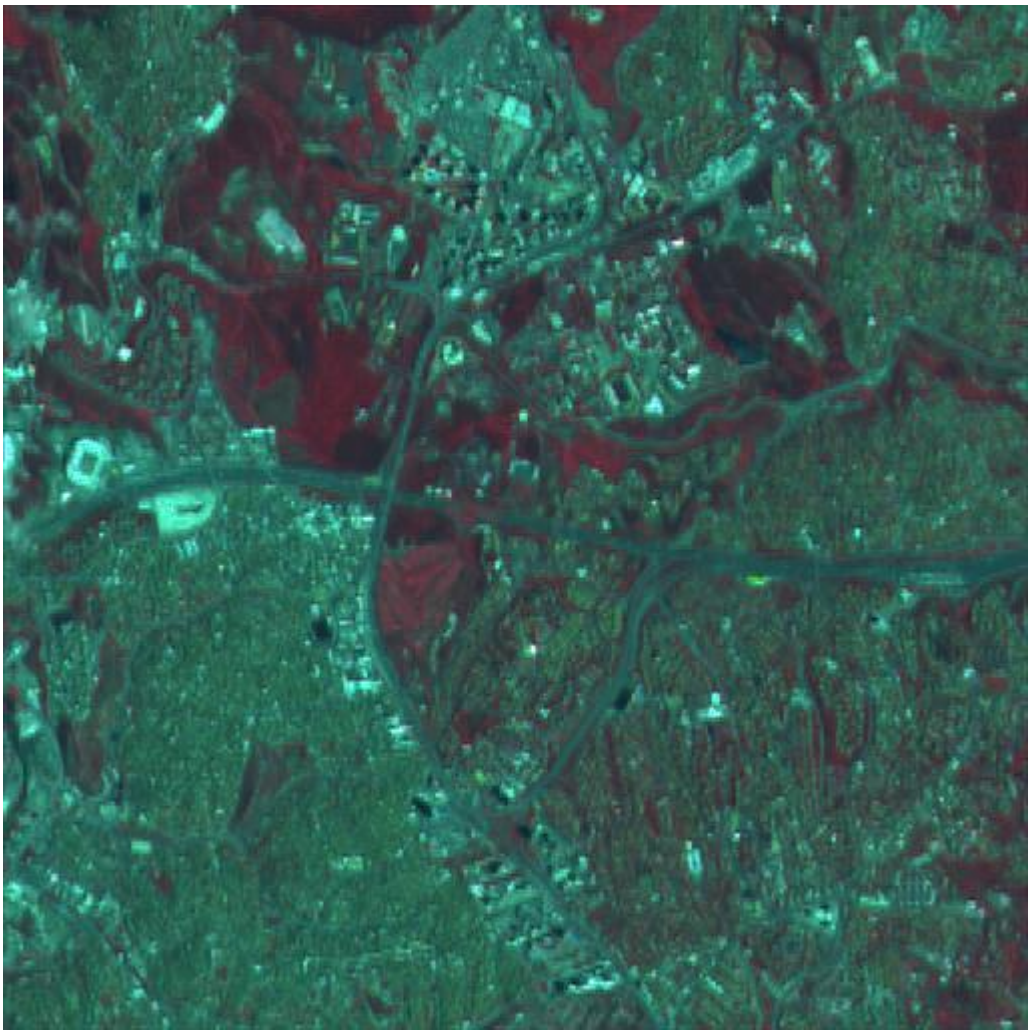
Şekil A.8 : Dalgacık dönüşümü toplama yöntemi I ile birleştirilmiş görüntü.



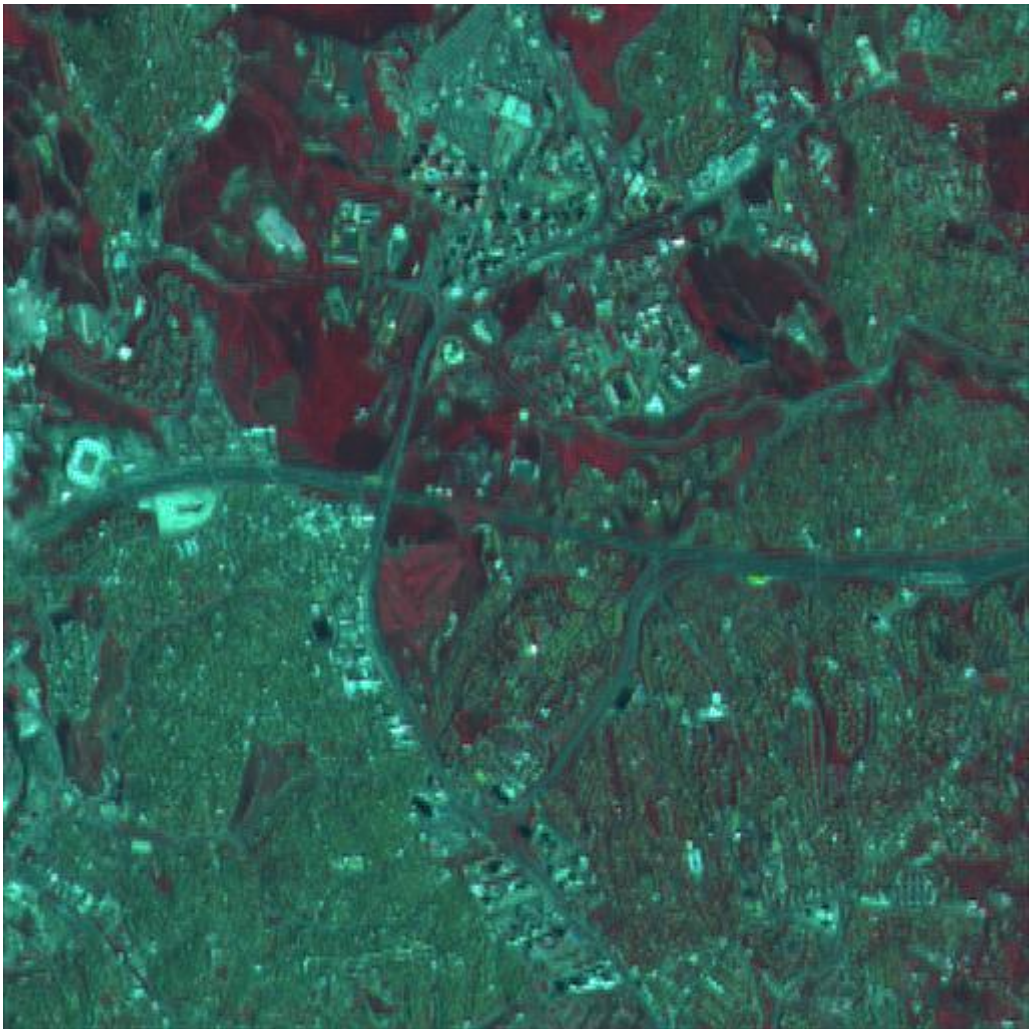
Şekil A.9 : Dalgacık dönüşümü toplama yöntemi II ile birleştirilmiş görüntü.



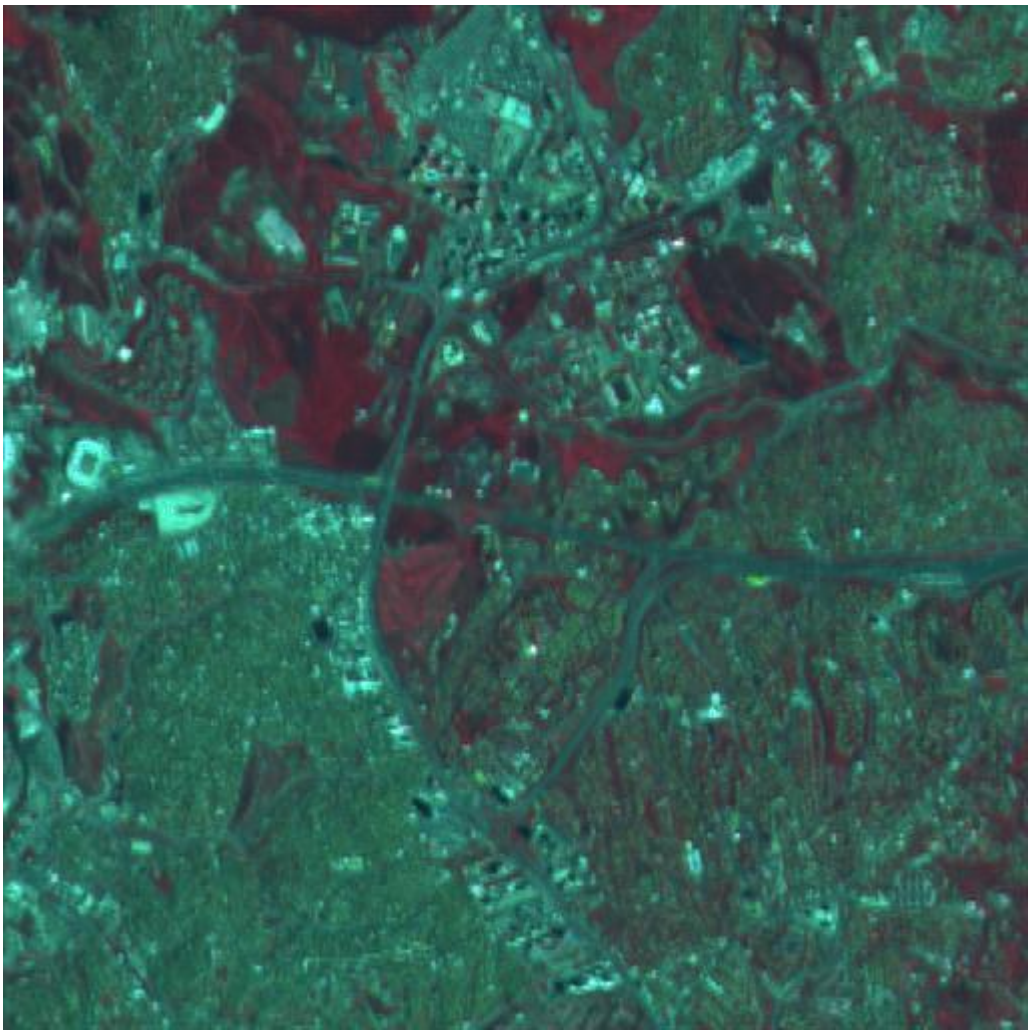
Şekil A.10 : Dalgacık dönüşümü katsayı yöntemi I ile birleştirilmiş görüntü.



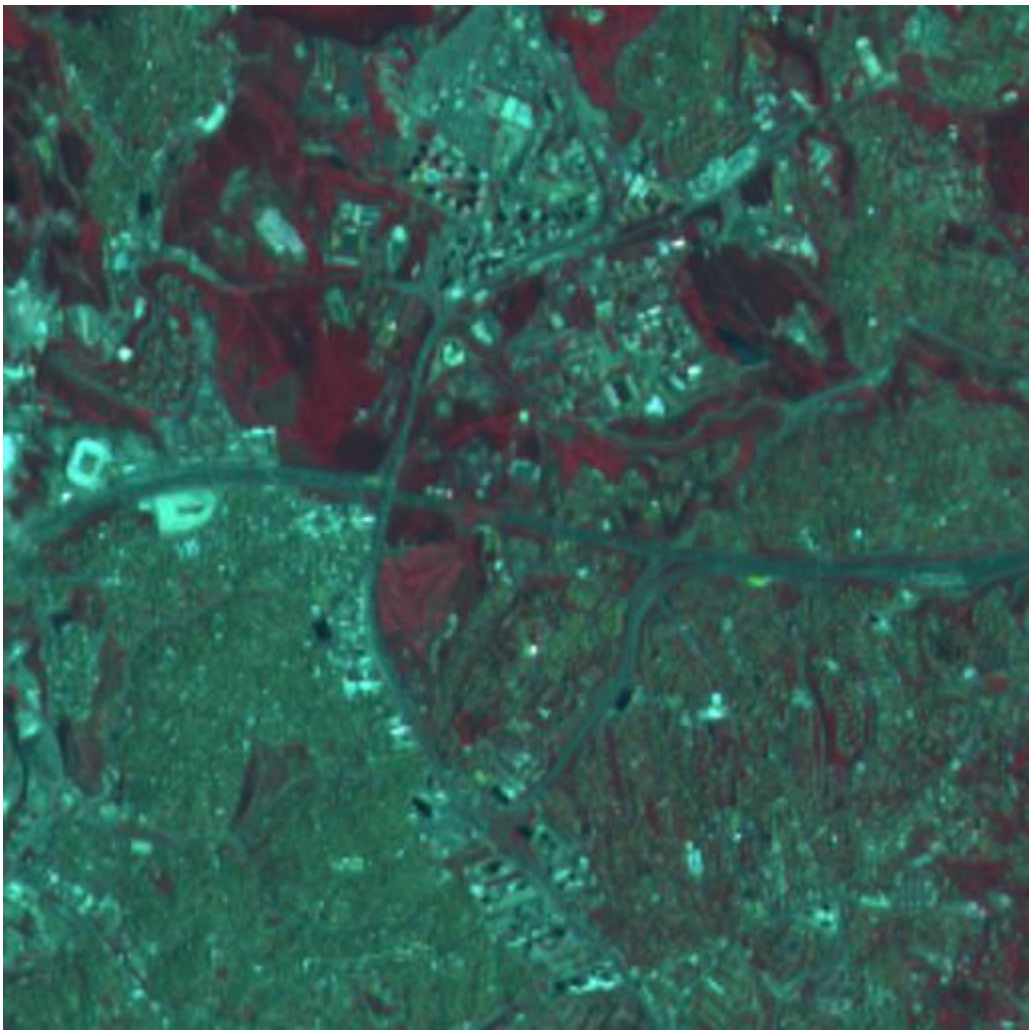
Şekil A.11 : Dalgacık dönüşümü katsayı yöntemi II ile birleştirilmiş görüntü.



Şekil A.12 : Dalgacık dönüşümü katsayı yöntemi III ile birleştirilmiş görüntü.



Şekil A.13 : IHS ve dalgacık yöntemi ile birleştirilmiş görüntü.



Şekil A.14 : PCA ve dalgacık yöntemi ile birleştirilmiş görüntü.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Alper Akoğuz

Doğum Yeri ve Tarihi: Ödemiş, 1 Ocak 1984

Adres: İTÜ Ayazağa Yerleşkesi Uydu Yolu Uydu Yer İstasyonu UHUZAM

E-Posta: alper.akoguz@yahoo.com

Lisans: İTÜ Telekomünikasyon Mühendisliği Bölümü (2003 – 2007)

Mesleki Deneyim ve Ödüller: İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektronik Haberleşme Mühendisliği Araştırma Görevlisi, İTÜ Uydu Haberleşmesi ve Uzaktan Algılama Uygulama Araştırma Merkezi Sistem Yöneticisi (13/b ile Atama)