

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Kampüs Alanı ve Çevresinin İkonos Uydu Görüntüleri ile Çok Yüksek Çözünürlüklü Sayısal Yüzey Modellemesi

Onur Köse

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Bardakçı Kampüsü, Tuşba, 65040, Van, Türkiye

*e-mail: onurkose@yyu.edu.tr

DOI: 10.57244/dfbd.1485711

Geliş tarihi/Received:17/05/2024

Kabul tarihi/Accepted:06/06/2024

Özet

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi (YYÜ) kampüs alanı ve yakın çevresi, yeni yerleşim alanları ve ilişkili bayındırlık çalışmaları nedeniyle hızla büyüyen kentsel gelişim bölgelerinden biridir. Van YYÜ Kampüsü ve yakın çevresinde büyük bina ve altyapı projeleri gibi mühendislik uygulamalarının doğru yer seçiminin optimizasyonu için çok yüksek çözünürlüklü (1-5 m piksel örnekleme) bir sayısal yüzey modelinin üretilmesi, çalışmanın temel amacını oluşturmaktadır. Hızla ilerleyen kentsel yayılım bölgelerinin yakınlarındaki mevcut tektonik fay hatlarının ortaya çıkarılmış olması, yeni yerleşim ve inşaat alanları ile diğer mühendislik yapılarının doğru yer seçimlerinin öngörülmesi için oldukça önemlidir. Buna paralel olarak çok yüksek çözünürlüklü sayısal yüzey modelleri, yerleşke planlama ve geliştirme çalışmalarına katkı sağlayabilecek bir ayrıntıyla tektonik fay hatlarının ortaya çıkarılmasında belirleyici rol oynamaktadır.

Bu çalışmada, uydu teknolojisi kullanarak, sahada yerinde ölçümlere ilişkin klasik yöntemlerle üretilenlerden çok daha düşük bir bütçeyle çok daha yüksek çözünürlüklü ve çok daha geniş alana yayımlı bir sayısal yükseklik modelinin oluşturulması planlanmıştır. Bu amaçla, İkonos uydusunun yüksek çözünürlüklü bir stereo görüntü çifti kullanılmış ve Van YYÜ yerleşke alanı yakın çevresi için epipolar görüntü işleme çalışmaları ile çok yüksek çözünürlüklü bir sayısal yüzey modeli üretilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İkonos uydusu, stereo görüntü çifti, sayısal yüzey modellemesi, DEM, Van YYÜ

Very High Resolution Digital Surface Modeling of Van Yüzüncü Yıl University Campus Area and Surroundings from Ikonos Satellite Images

Abstract

Campus area of Van Yüzüncü Yıl University (YYU) and immediate surrounding is one of the rapidly growing urban development zones due to new settlement areas and related public works. To produce a very high resolution (1-5 m pixel sampling) digital surface model for the optimization of accurate site selection of the engineering applications as great construction and infrastructure projects in Van YYU Campus and surroundings, constitutes the main aim of the study. Revealing the existing tectonic fault lines in vicinity of rapidly advancing urban sprawl zones is very important for predicting the correct site selection of new settlement and construction areas and other engineering structures. Parallel to this, very high-resolution digital surface models play a decisive role in revealing tectonic fault lines in detail that can contribute to settlement improving and planning studies.

In this study, it was planned to create a digital elevation model using satellite technology, with a much higher resolution and a much wider area, by a much lower budget than those produced by classical methods involving in-situ field surveys. For this purpose, a high-resolution stereo image pair of the Ikonos satellite was used and a very high-resolution digital surface model was produced by epipolar image processing studies for the Van YYU campus area and its immediate surroundings.

Keywords: Ikonos satellite, stereo image pair, digital surface modeling, DEM, Van YYU

Giriş

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi (YYÜ) kampüs sahası ve yakın çevresi, zayıf zeminler üzerinde hızlı yapılanan kentsel gelişim alanlarından biridir. Van YYÜ kampüs alanı sınırında, Holosen yaşlı karasal sedimanları keserek son bir-kaç bin yıllık süre içerisinde büyük ve yıkıcı bir-kaç depremin yaşandığını kanıtlayan bir fay hattının varlığı önceki çalışmalarla belirlenmiştir (Köse ve Özkaymak, 2002; Özkaymak ve Köse, 2002; Özkaymak, 2003; Özkaymak ve ark., 2003; Örçen ve ark., 2004; Özkaymak ve ark., 2004). Bu özellikleriyle Van YYÜ kampüs sahası ve yakın çevresi, binalaşma, altyapı ve çevre tasarımı çalışmaları şeklindeki mühendislik uygulamalarının yer seçimlerinde son derece dikkatli kararların alınması gereken bir bölgedir. Bu kararların alınmasında belirleyici işlev üstlenecek ve jeolojik risklerin ortaya konmasına katkı sağlayacak ayrıntıya sahip bir sayısal yüzey topografik modellemesinin üretilmesi oldukça önemlidir.

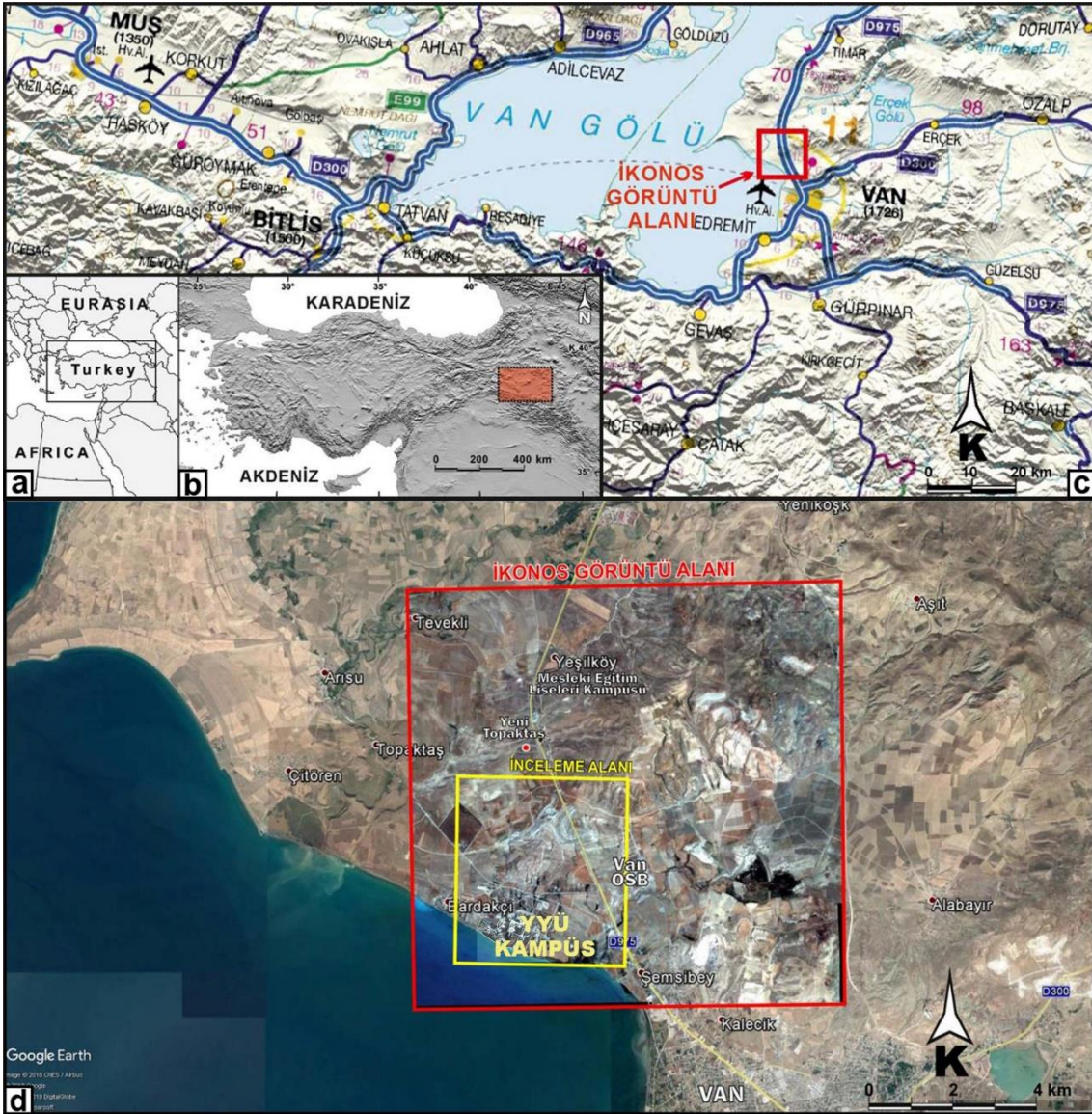
Van YYÜ kampüs alanı gibi yaklaşık 8 bin dönümlük geniş ve düşük engebeli bir arazi üzerinde ihtiyaç duyulacak ayrıntıda bir topografik haritalama, klasik ölçümleme yöntemleri ile birkaç yıla varacak süreyle sahada aletli ölçüm çalışması yürütülmesini zorunlu kılar. Buna çok daha hızlı bir yöntem alternatifi olarak stereografik hava fotoğraflarından topografik veri üretmek sunulabilir. Bu durumda ise, uçak, pilot ve tertibat kiralama da içeren yüksek bedelli bir hizmet alımı söz konusu olmaktadır. Ayrıca bu yöntemde, uçuş güzergahındaki hava ve rüzgâr koşulları ise uçuş yüksekliğinin daimî stabilitesini zorlaştırabilirken, üretilecek topografik verinin hassasiyetine de önemli derecede etki edebilmektedir. Oldukça yüksek maliyet gerektiren bu metodolojiler yerine uydu teknolojileri vasıtasıyla topografik model üretmek, önemli boyutta ekonomik ve zamansal kayıpların önüne geçilmesini mümkün kılmaktadır.

Çalışmada, inceleme alanı olan Van YYÜ Kampüsü ve yakın çevresinin çok yüksek çözünürlüklü (1-5 m) sayısal yüzey modelini oluşturmak için, İkonos Uydusunun bir stereo görüntü çifti kullanılmıştır. Görüntü kapsama sahası, yaklaşık 101 km²'lik yüzölçümüne karşılık gelirken Van Gölü'nün doğu kıyısında Van şehir merkezinin yaklaşık 15 km kuzeyini ortalamaktadır (Şekil 1). Uydu görüntüsü, Türkiye'nin topografik pafta indeksinde, 1/25000 ölçekli K50c1 ve K50c4 paftaları içerisinde yer almaktadır.

İnceleme alanı, İkonos uydu görüntüsü kapsama sahasının güneybatı çeyreğinde, Van YYÜ kampüs alanı ve yakın çevresini içermektedir. İnceleme alanının tamamı 1/25000 ölçekli K50c4 topografik paftası içerisinde yer alırken, 6 boylam derecesi tabanlı UTM 38. zonunda ED50 elipsoidini esas alan projeksiyon sisteminin 349000 – 353000 Doğu ve 4269175 – 4273500 Kuzey koordinatlarıyla sınırlandırılmış olup, 17.3 km²'lik bir alana karşılık gelmektedir. İnceleme alanının bölgesel ve lokal ölçekte genel ve ayrıntılı jeolojik özelliklerine Köse (2019) tarafından detaylı olarak değinilmiş, inceleme alanının zeminleri, tektoniği ve depremselliği konularında geniş bilgi sunulmuştur.

Bilgisayar ortamında, yeryüzü yükseklik değerlerini içeren işlenebilir sayısal veri dosyaları olup, yerbilimleri çalışmalarında en az uydu görüntüleri kadar önem taşıyan sayısal yükseklik modelleri, özellikle topografik veri ihtiyacı duyulan uygulamalarda ayrı bir öneme sahiptir (Köse ve ark., 1997). Sayısal topografik model, sayısal yükseklik modeli, sayısal arazi modeli ve sayısal yüzey modeli gibi değişik isimlerle de anılan bu topografik modeller, günümüzde uzay jeodezisi ve uydu teknolojileri kullanılarak üretilmektedir. Bu amaca yönelik olarak, erken dönemlerde stereo

görüş özelliği taşıyan hava fotoğraflarından sonra pasif (optik) algılama sistemine sahip uyduların görüntüleri kullanılmaya başlanmıştır (Liboutry, 1991; Thoué, 1993). Yaklaşık aynı dönemlerde hem hava hem de uydu nâkili radar cihazlarını kapsayan aktif sistemlerle de sayısal topografik veri üretmeye yönelik yöntemler geliştirilmeye çalışılmıştır (Graham, 1974; Zebker ve Goldstein, 1986; Curlander ve McDonough, 1991; Massonnet, 1993; Mouginis-Mark ve Garbeil, 1993). Ayrıca bu yöntemler kendi içlerinde teknik gelişmelere bağlı olarak, orto-foto, orto-görüntü, radar görüntülemesi, interferometri (Zebker ve ark., 1992; Massonnet, 1993; Massonnet ve Feigl, 1998) gibi farklı alt metodolojileri de kapsamaktadır. 2020 yılı öncesinde radar uydularının verilerinden üretilen sayısal yükseklik modellerinin piksel çözünürlüklerinde 10 m mertebesine ulaşılmıştır.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan İkonos Uydusu görüntü alanı ve inceleme sahasının konumu. (a) Dünya, (b) Türkiye, (c) Türkiye Ulaşım Ağı Haritası Van Gölü çevresi ve (d) uydu tabanlı yakın bölge GoogleEarth haritası üzerinde konumu. İkonos Uydusu görüntü alanı kırmızı çerçeve ile ve inceleme alanı sarı çerçeve ile gösterilmiştir.

Büyük ölçek haritalama gerektiren birçok alanda kullanılacak olan sayısal yükseklik modellerinde ise 1–5 m arası çok yüksek çözünürlük değerlerine ihtiyaç duyulur. Sayısal görüntüleme ve teleoptik teknolojilerindeki gelişmelerin bir sonucu olarak, 24 Eylül 1999’da yörüngelendirilen ve optik (pasif) uydu sistemlerinde yeni bir dönem başlatan İkonos-2 uydusu, sivil amaçlı çalışmalara 1 Ocak 2000 tarihinden itibaren çok yüksek çözünürlüklü görüntülerin katılımını da beraberinde getirmiştir. Bunu takiben, 2001 yörüngeli QuickBird, 2007 yörüngeli WorldView-1, 2008 yörüngeli GeoEye-1 ve 2009 yörüngeli WorldView-2 ve benzeri birçok uydunun devreye girmesi, çok yüksek çözünürlüklü ve stereo özellikli optik uydu görüntülerinin teminini ve dolayısıyla çok yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modellerinin üretimini özellikle son 20 yıldan bu yana oldukça kolaylaştırmıştır.

Materyal ve Yöntem

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi kampüs alanı ve yakın çevresine ilişkin çok yüksek çözünürlüklü bir sayısal yüzey modeli oluşturmaya yönelik olarak, pasif (optik) uydu sistemi tabanlı olan, İkonos Uydusu Precision Stereo 1m Pan-Sharpned görüntü çifti çalışmanın ana materyali olarak değerlendirilmiştir. Bu görüntü çiftinden itibaren sayısal yükseklik modeli oluşturma ve üç boyut (3D) analizi için jeomatik veri işlenimine yönelik olarak tam modüllü PCI-Geomatica yazılımı kullanılmıştır.

Materyal

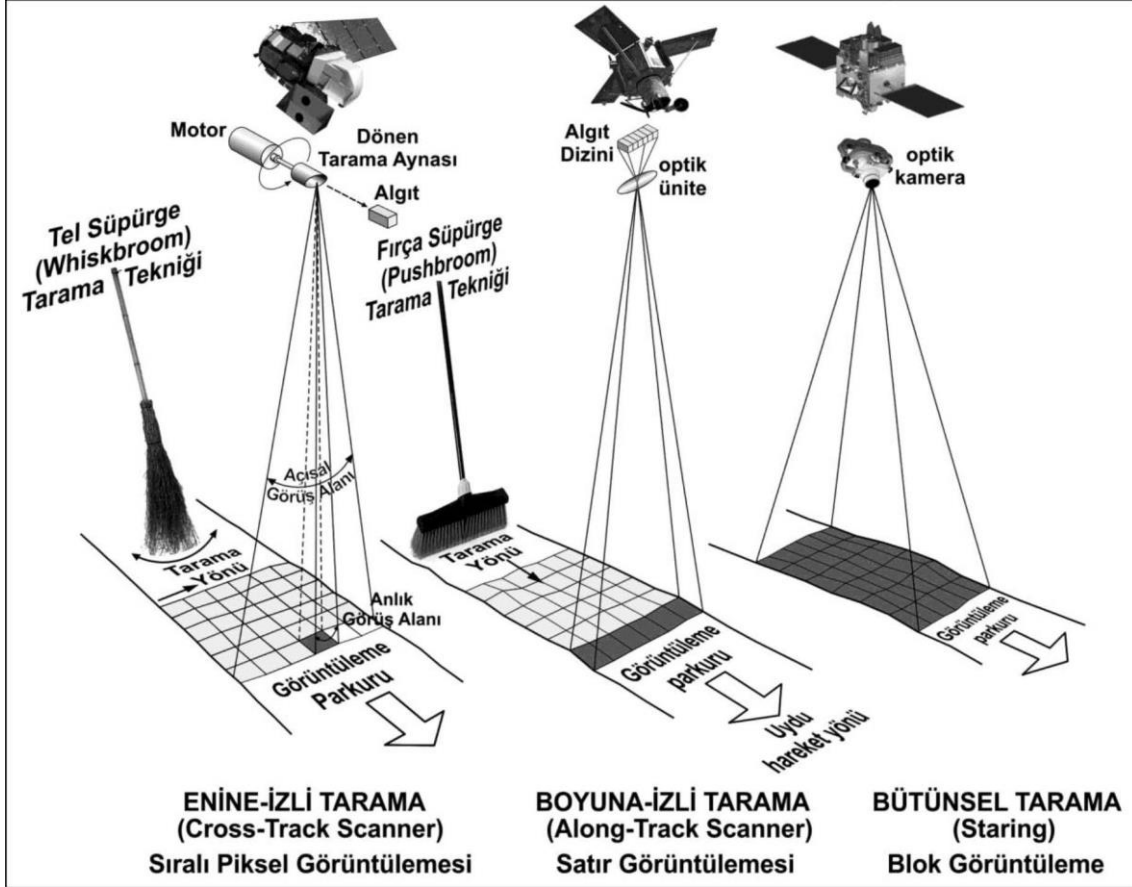
İkonos uydusunun ve görüntülerinin genel özellikleri ve diğer uyduların görüntü verilerinden farklılığını ortaya koyan temel yapı taşları üzerine, Grodecki ve Dial, (2001), Kramer (2002), Avrupa Uzay Ajansı (ESA, 2006), GeoEye kuruluşu (GeoEye, 2006) ve Köse (2019) tarafından hazırlanmış bilgiler aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Optik görüntüleme yapan uydu sistemlerinde, yeryüzü görüntüleme parkuru üzerinden, a- uydu hareket yönünün dikine yönde ilerlemeli enine-izli taramayla (cross-track scanning) anlık noktasal görüntü alan tel-süpürge (whiskbroom), b- uydu hareket yönünde ilerlemeli boyuna-izli taramayla (along-track scanning) anlık satır görüntüsü alan fırça-süpürge (pushbroom) ve c- uydu hareket yönünde ilerlemeli ve kadraj (frame) sensörlerle anlık blok görüntü alan bütünsel (staring) tarama olmak üzere üç farklı görüntüleme tekniğinden (Şekil 2) birisi tercih edilir (Köse, 2019).

2014 Aralık ayına kadar görüntüleme yapan İkonos-2 uydusu Yerküre Alçak Yörüngeleri (LEO; Low Earth Orbits) ile işlev yapan bir uzay cihazı olmuştur. Ağırlığı 817 kg olan uzay aracı, mükemmel gözlemlene kabiliyetlerine imkân veren ve herhangi bir yöne 30°’lik bir bakış alanı (FOR; Field of Regard) sağlayan bir gövdesel yönelim tekniğine sahiptir. İkonos-2 Uydusu, 681-709 km arasında değişen bir yükseklikten, yörüngede 98.1° eğim ve 98 dakika dönüş periyodu ile en çok 14 gün yeniden-görüntüleme tekrarı, 40° enlemi ve üzerindeki alanlarda 1-3 gün arası yeniden-geçiş tekrarı özelliklerinde olan, yaklaşık-kutupsal ve gün-senkronizeli eşzamanlı dairesel bir yörüngeye sahip olmuştur.

İkonos uydusunda 6500 satır-görüntü özelliğinde görüntü verisi üretimi sağlayan bir fırça-süpürge tarayıcı teknolojisi (geniş odak düzlemi tarayıcı dizisi) kullanılarak, PAN (Pankromatik, gri tonlu tek bantlı) ve MS (Multi-Spektral; renk oluşturan çok bantlı) modlarda eşzamanlı görüntüleme sağlanmıştır. Cihazın tarayıcı dizisindeki piksel boyutu, PAN tarayıcılar için 12 µm ve MS tarayıcılar için 48 µm’dir. PAN ve MS görüntü verilerine ait mono ve stereo görüntü kaydı aynı-zamanlı ve bütünsel eş-kayıtlı olarak yapılır. Uydunun yeryüzündeki konumsal çözünürlüğü (GSD; ground sampling

distance) 4m olan 4 bantlı MS sensörleri, Landsat-7 uydusunun 1-4 bandları ile hemen hemen aynı spektral özelliklere sahiptir. PAN sensörü ise 1m konumsal çözünürlük sağlar.



Şekil 2. Yeryüzü görüntüleme uydularında kullanılan sensör türleri ve tarama teknikleri (Köse 2019).

Bir görüntü çekiminin yaklaşık geometrisi, parametre içerik dosyasında (metadata) bulunan sensör azimutu (kuzeyleme) ve sensör düşüm (elevation) açıları ile tanımlanır (Grodecki ve Dial, 2001). Bu değerler, ham görüntülerden türev ürünlerin oluşturulması sırasında, işlemlerde göz önüne alınması gereken itibari (nominal) değerlerdir.

Daha önce yörüngelendirilmiş ve çoklu yörünge geçişlerinden enine-izli stereo görüntüler alan SPOT uydusu örneğinden farklı olarak, İkonos uydusu aynı (tek) yörünge geçişli boyuna-izli stereo-çift görüntüler toplamıştır. Bu, bir stereo-çifti oluşturan iki görüntünün aynı yörüngesel geçişte alınması anlamına gelir. İkonos, yörüngesinde düzenli veri topladığı parkura ilerleme yönünde bakarak geçiş yaparken, stereo çekim yapılacak hedefe yaklaştıkça, stereo-çiftinin ilk ayağını toplamak için ilerleme yönünde hedefe kilitlenerek gerektiği şekilde bakışını rotadan ayırır, döner ve eğilir.

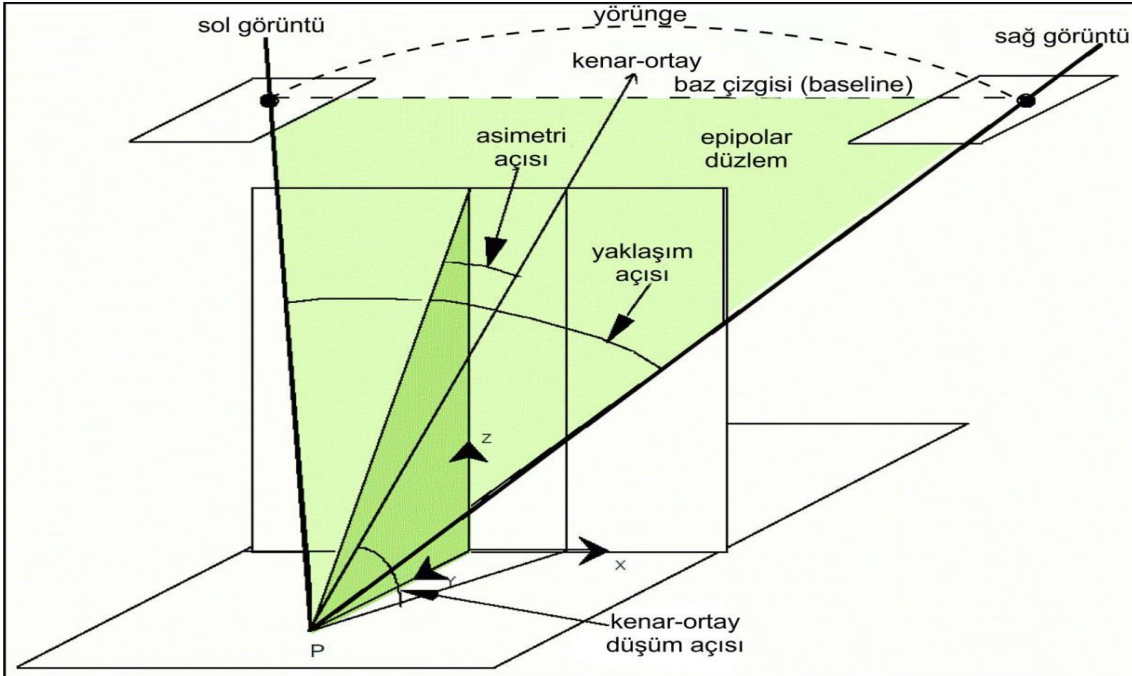
İlk görüntü alındıktan en çok yüz saniye kadar sonra, aynı alanı tekrar görüntülenmek üzere uyduya kendi eksenini üzerinden manevra yaptırılır, bu sefer yörüngesinde hala ileriye doğru giderken geriye bakacak şekilde görüntü alır (Grodecki ve Dial, 2001). Ancak stereo-çiftin ikinci görüntüsünün geriye bakılarak alınması

zorunluluk arz etmez, ikinci görüntü ilk görüntüden sonraki 50-60 saniye kadar bir süre içerisinde yine ilerleme doğrultusuna yönelik olarak da alınabilir.

İkonos uydusunun görüntülerinde hatalı kayıt, görüntü kayması ve radyometrik ayar düzeltmeleri, piksel konumlarının keskinleştirilmesine ilişkin MTF (modülasyon transfer fonksiyonu) dengelemesi gibi görüntü iyileştirme (dengeleme) algoritmalarının uygulandığı veri işleme çalışmaları sonucunda coğrafi atıflandırma sağlanır.

İkonos'tan toplanan görüntü ürünleri konumsal doğruluğa göre sınıflandırılır. Bu sınıflama, görüntüdeki bir hedef noktanın yerdeki gerçek konumunun tanımlanmış doğruluğu içerisinde kalacak şekilde bir güvenilirlik derecesi ile belirlenir (GeoEye, 2006). İkonos görüntü ürünlerinin konumsal doğruluk seviyesine göre belirlenen 6 farklı kademesi vardır. Bunlar *Geo*, *Standart Ortho*, *Reference*, *Pro*, *Precision* ve *Precision Plus* şeklindeki standart isimleriyle kullanıcılara servis edilir (GeoEye, 2006). *Precision* kademe stereo görüntüler, 4 m çözünürlüklü MS bandlarının 1 m çözünürlüklü PAN bandı ile keskinleştirilmesini takiben 1 m çözünürlükte (*Precision Pan-Sharpned* koduyla) sağlanabilmektedir. *Precision* stereo görüntü çiftleri, kullanıcılara algoritmik kamera modeli oluşturmaya yönelik bir rasyonel polinomal katsayı (RPC, Rational Polynomial Coefficient) dosyasıyla birlikte teslim edilir. Rasyonel Polinomal Kamera Modeli ve Görüntü Geometri Modeli (IGM, Image Geometry Model) olarak da isimlendirilen bu RPC dosyası, üç boyutlu konum koordinatlarının, sayısal yükseklik modellerinin ve orto-rektifiye görüntülerin fotogrametrik olarak çıkarılması için jeomatik yazılım paketlerine kamera modeli verilerini sağlar.

Uydusal stereo görüntülemenin kavramsal parametreleri genel haliyle Şekil 3'de gösterilmiştir.

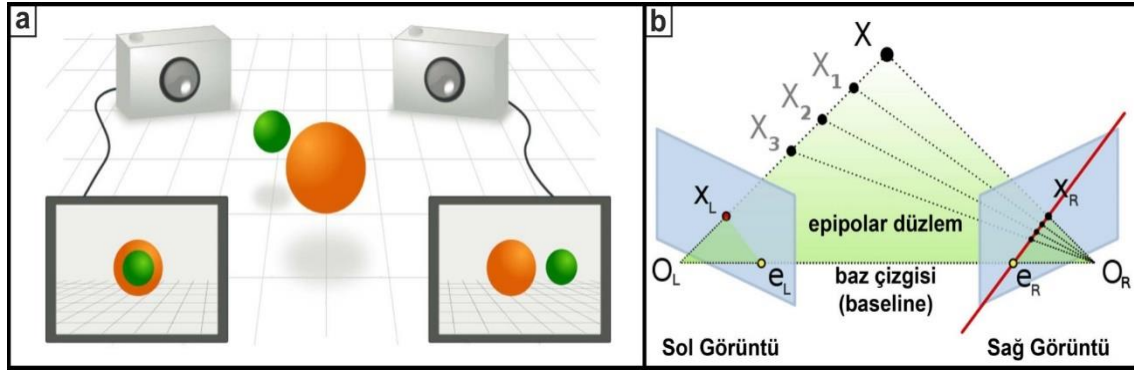


Şekil 3. Uydusal stereo görüntüleme kavramsal parametreleri (Ezekiel Enterprises, 2018'den uyarlanmıştır)

Bu çalışmada İkonos Precision Stereo 1m Pan-Sharpned görüntü çifti temel materyal olarak kullanılarak, epipolar eşleme uygulamasıyla çok yüksek çözünürlükte bir sayısal yükseklik modeli oluşturma yoluna gidilmiştir.

Yöntem

Epipolar örnekleme, görüntü eşleme, stereoskopik görüntüleme ve sayısal yükseklik modeli üretimi gibi çeşitli fotogrametrik işlem uygulamalarının önkoşuludur. Epipolar geometri stereo-görü geometrisine karşılık gelir. İki farklı kamera birbirine yakın mesafede ayrı iki noktadan 3 boyutlu (3B) bir hedefin görüntüsünü aldığıında (Şekil 4a), 3B hedef obje ve noktalar ile bunların yansıtılmış oldukları 2 boyutlu (2B) görüntü üzerindeki izdüşümleri arasında (Şekil 4a), fonksiyonlarla tanımlanabilen bir dizi geometrik ilişki oluşur (Şekil 4b). Bu geometrik ilişkiler, genellikle söz konusu kameralara iğne-deliği (pinhole) kamera modeli ile yaklaşım yapılabileceği varsayımıyla kurulur (Wikipedia contributors 2024).



Şekil 4. Epipolar geometri ve tipik kullanım durumu (Nordmann, 2008). (a) İki kamera, farklı bakış noktalarından aynı sahnenin fotoğrafını çeker; (b) epipolar geometri daha sonra ortaya çıkan iki görü arasındaki ilişkiyi açıklar.

Şekil 4b, X noktasına bakan iki iğne-deliği kamerasını (O_L , sol objektif ve O_R , sağ objektif) göstermektedir. O_L ve O_R , iki kamera merceğinin simetri merkezlerini temsil eder. X , her iki kamerada da ilgi alanını (hedef noktayı) temsil eder. X_L ve X_R noktaları ise X noktasının sırasıyla sol ve sağ görüntü düzlemleri üzerine yansıtımlarıdır. Her kamera, 3B bir ortamın 2B bir görüntüsünü yakalar. 3B'den 2B'ye bu dönüşüm, perspektif projeksiyon olarak isimlendirilir ve iğne-deliği kamera modeli ile açıklanır. Diğer taraftan, Şekil 4b'ye dikkat edecek olursak, epipolar bir görüntü çiftinde, bir görüntüden aynı epipolar çizgi üzerinden yayılan her bir ışın (X_1, X_2, \dots, X_n) diğer görüntüdeki tek bir noktaya karşılık gelmektedir (Wikipedia contributors 2024).

Kamera merceklerinin optik merkezleri ayrı (noktalarda) olduğundan, her merkez diğer kameranın görüntü düzleminde ayrı bir noktaya yansır. *Epipoller* veya *epipol noktaları* olarak isimlendirilen bu iki görüntü noktası, e_L ve e_R ile gösterilir. Kendilerine ilişkin görüntü düzlemlerindeki e_L ve e_R epipollerinin her ikisi ile O_L ve O_R optik merkezlerinin her ikisi, tek bir 3B çizgi üzerinde uzanırlar. O_L-X Çizgisi, soldaki kamera merceğinin optik merkezi ile doğrudan aynı izdüşüm çizgisi üzerinde bulunduğundan, sol kamera tarafından bir nokta olarak görülür. Buna karşın, sağ kamera bu çizgiyi kendi görüntü düzleminde bir çizgi olarak görür. Sağ kameradaki bu çizgi (e_R-X_R), bir *epipolar çizgi* olarak adlandırılır. Simetrik olarak tersinden ele

alındığında, sağ kamera tarafından bir nokta olarak görülen O_R-X çizgisi, sol kamera tarafından e_L-X_L epipolar çizgisi olarak görülür (Wikipedia contributors 2024).

Bir epipolar çizgi, 3B uzaydaki X noktasının konumunun bir fonksiyonudur; yani X değiştiğinde, her iki görüntüde bir dizi epipolar çizgi üretilir. 3B O_L-X çizgisi, O_L merceğinin optik merkezinden geçtiğinden, sağdaki görüntüdeki buna karşılık gelen ilgili epipolar çizgi e_R epipolünden (ve buna karşılık olarak da sol görüntüdeki epipolar çizgiler e_L epipolünden) geçmelidir. Bir görüntüdeki tüm epipolar çizgiler, o görüntünün epipolar noktasını içerir. Gerçekte, epipolar noktayı içeren herhangi bir çizgi, 3B bir X noktasından türetilebileceğinden dolayı, bir epipolar çizgidir. Alternatif bir canlandırma olarak, *epipolar düzlem* adı verilen bir düzlemi oluşturan X , O_L ve O_R noktalarını göz önünde bulunduralım. Epipolar düzlem, epipolar çizgiler oluşturacak şekilde her bir kameranın görüntü düzlemiyle kesişir. Tüm epipolar düzlemler ve epipolar çizgiler, X 'in 3B sahne içerisinde nerede bulunduğu bakılmaksızın epipol ile kesişir (Wikipedia contributors 2024).

İkonos uydusu gibi 1 m GSD'li fırça-süpürge sensörlere ilişkin tamamıyla parametrik kamera modelleri, algoritmalarda uygulanmasını olağanüstü zora sokacak şekilde son derece karmaşık bir yapıya sahiptir. Matematiksel olarak basitleştirilmiş ve dolayısıyla algoritmalarda uygulanması kolaylaştırılmış olan İkonos RPC modeli, ayrıca uydunun kamera fiziksel modelinin tam doğruluğunu da korur. Yer kontrol noktaları (YKN) ile iyileştirildiğinde, RPC kullanılan yeniden örneklemelelerde piksel-altı doğruluklara erişilebilmektedir (Dial ve Grodecki, 2002; Fraser ve ark., 2005).

Çok yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modelleri oluşturmaya yönelik optik uydu görüntülerinin epipolar eşleme çalışmalarında, fiziksel kamera modellerinden rasyonel polinomal katsayı modellerine kadar değişik fonksiyonel algoritmaların uygulanması ve YKN'nin işlemlere katılımıyla oldukça büyüyen ağır matematiksel süreçlere ilişkin ayrıntılı bilgilere önceki çalışmalardan (örn, Grodecki, 2001; Dial ve Grodecki, 2002; Grodecki ve Dial, 2001; Di ve ark., 2003a ve b; Li ve ark., 2003; Fraser ve ark., 2005; Yılmaz, 2007; Oh, 2011; Köse, 2019 vb.) ulaşmak mümkündür.

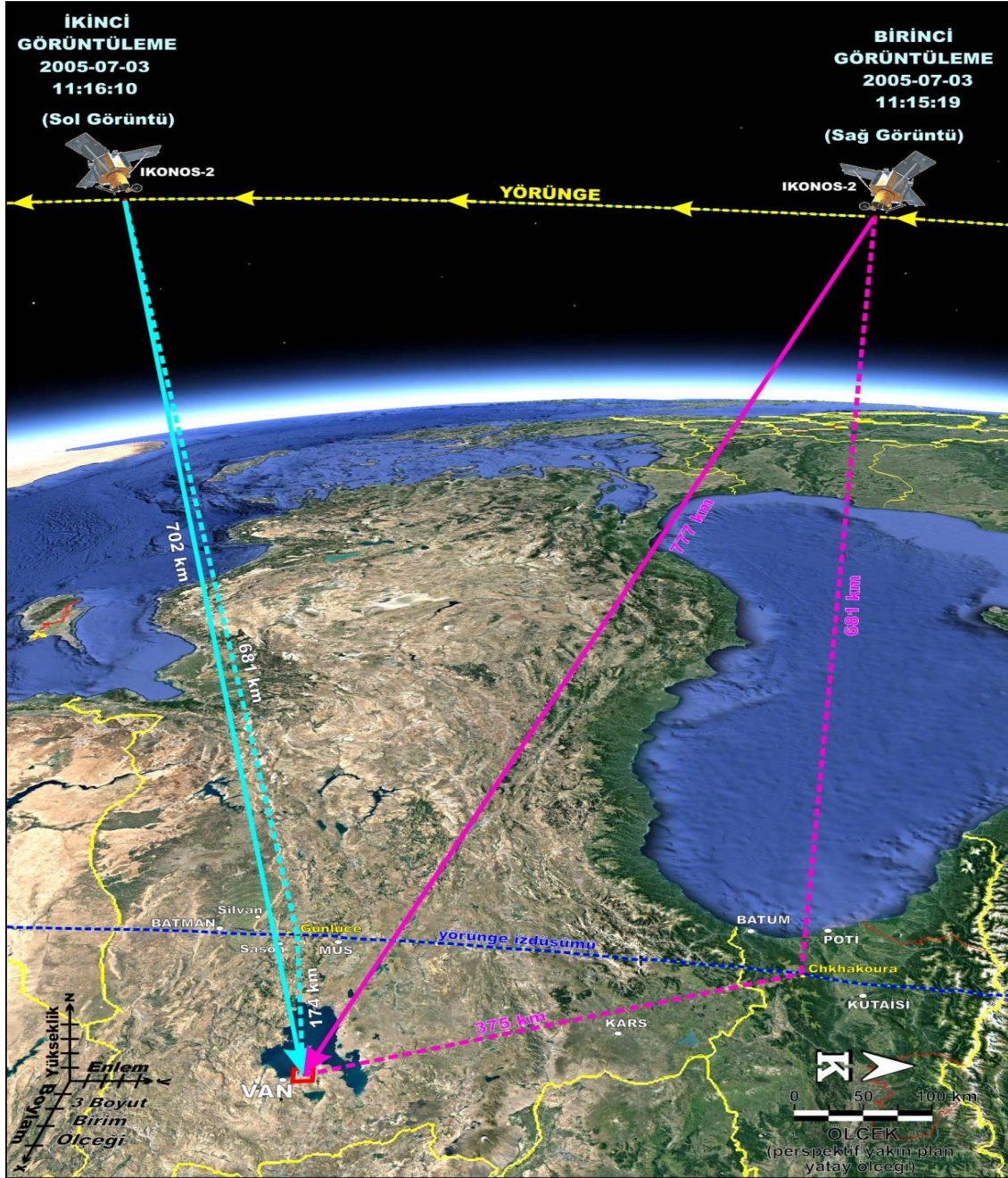
Bulgular

Bu çalışmada ana veri elemanı olan İkonos uydusu stereo görüntü çiftinin çekimi 03 Temmuz 2005 tarihinde öğleye doğru ve %100 gibi yüksek bir bulutsuzluk oranı ile gerçekleştirilmiştir. Bu görüntülemelere yönelik oldukça uzun olan ve aşağıda kısaca özetlenen parametre içerik dosyasına (metadata) ilişkin bilgiler, görüntüleme geometrisini açık bir şekilde ortaya koymamıza imkân sağlamıştır (Şekil 5 ve 6).

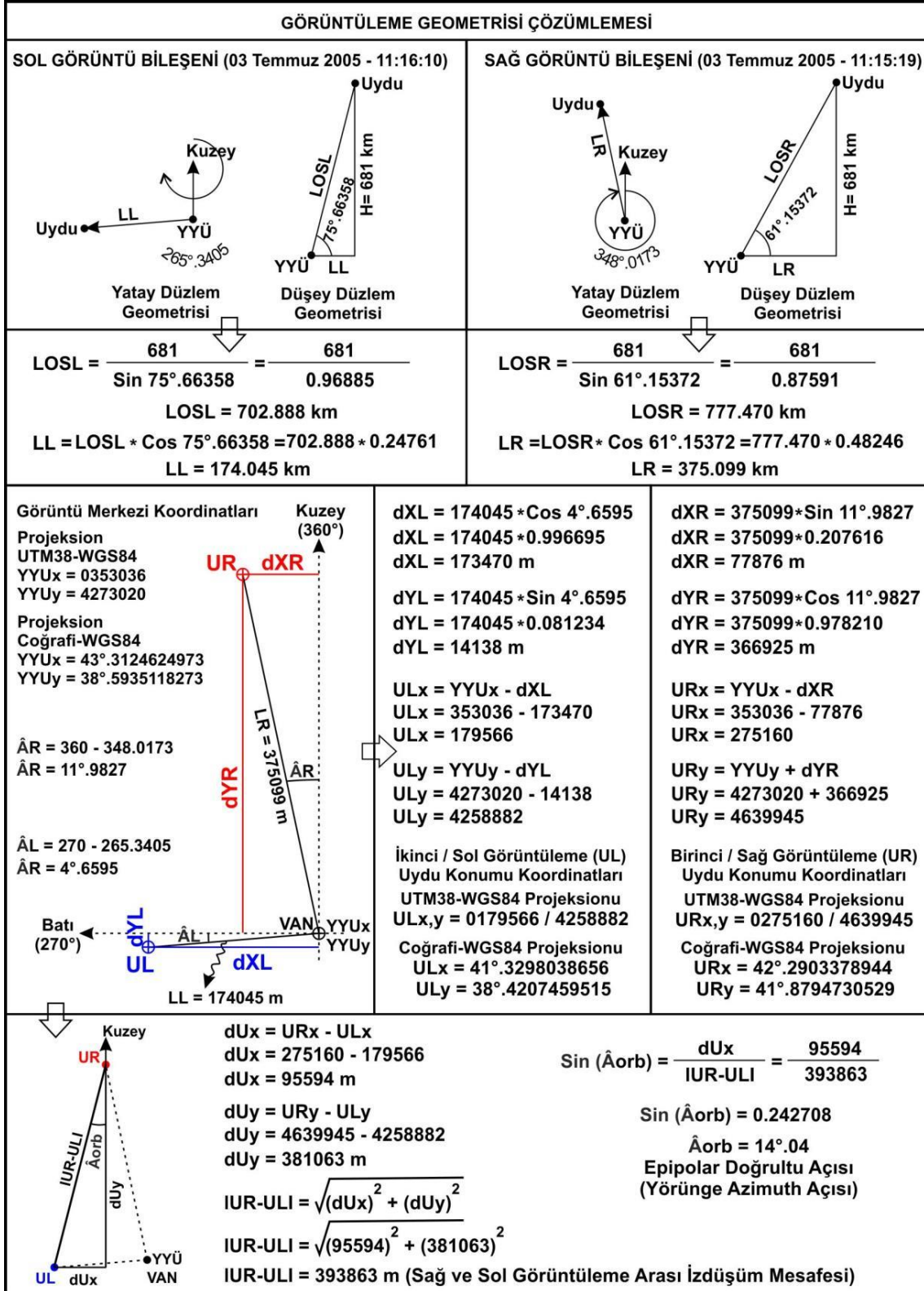
Stereo-çift kaynak görüntü sağ bileşeni (Source Image ID: 2005070308151900000011120189; Product Image ID: 000), 03 Temmuz 2005 tarihinde Türkiye saati ile 11:15:19'da, kampüs alanına 777.5 km bakış mesafesi ve yatayda 375.1 km mesafe ile 681 km yükseklikten 138.1436° güneş ışığı azimutu ve 70.41519° güneş ışığı düşüm açısı koşullarında, 348.0173° itibari azimut ve 61.15372° itibari düşüm açısı geometrisinde görüntülenmiştir (Şekil 7a). Stereo-çift kaynak görüntü sol bileşeni (Source Image ID: 2005070308161000000011120190; Product Image ID: 001), birinci görüntüden 51 saniye sonra, Türkiye saati ile 11:16:10'da, kampüs alanına 702.9 km bakış mesafesi ve yatayda 174 km mesafe ile 681 km yükseklikten, 138.6279° güneş

ışığı azimutu ve 70.52610° güneş ışığı düşüm açısı koşullarında 265.3405° itibari azimut ve 75.66358° itibari düşüm açısı görüntülenmiştir (Şekil 7b).

Stereo-çift kaynak görüntü bileşenleri, kendilerine ilişkin rasyonel polinomal katsayıları (RPC) veri dosyaları vasıtasıyla oluşturulan Rasyonel Fonksiyon Modelleri (RFM) ile piksel konumlarının keskinleştirilmesine ilişkin MTFC (modulation transfer function compensation; modülasyon transfer fonksiyonu dengelemesi) işlemine alınarak yapılan dengeleme çalışması sonrasında, yer-atıflı (geocoded) olarak işlenerek koordinatlandırılmış ve 1 m çözünürlükte yeniden örneklendirilmişlerdir (Şekil 7c ve 7d).



Şekil 5. Van YYÜ Kampüs Alanı Ikonos uydu görüntülemesinin geometrisi.



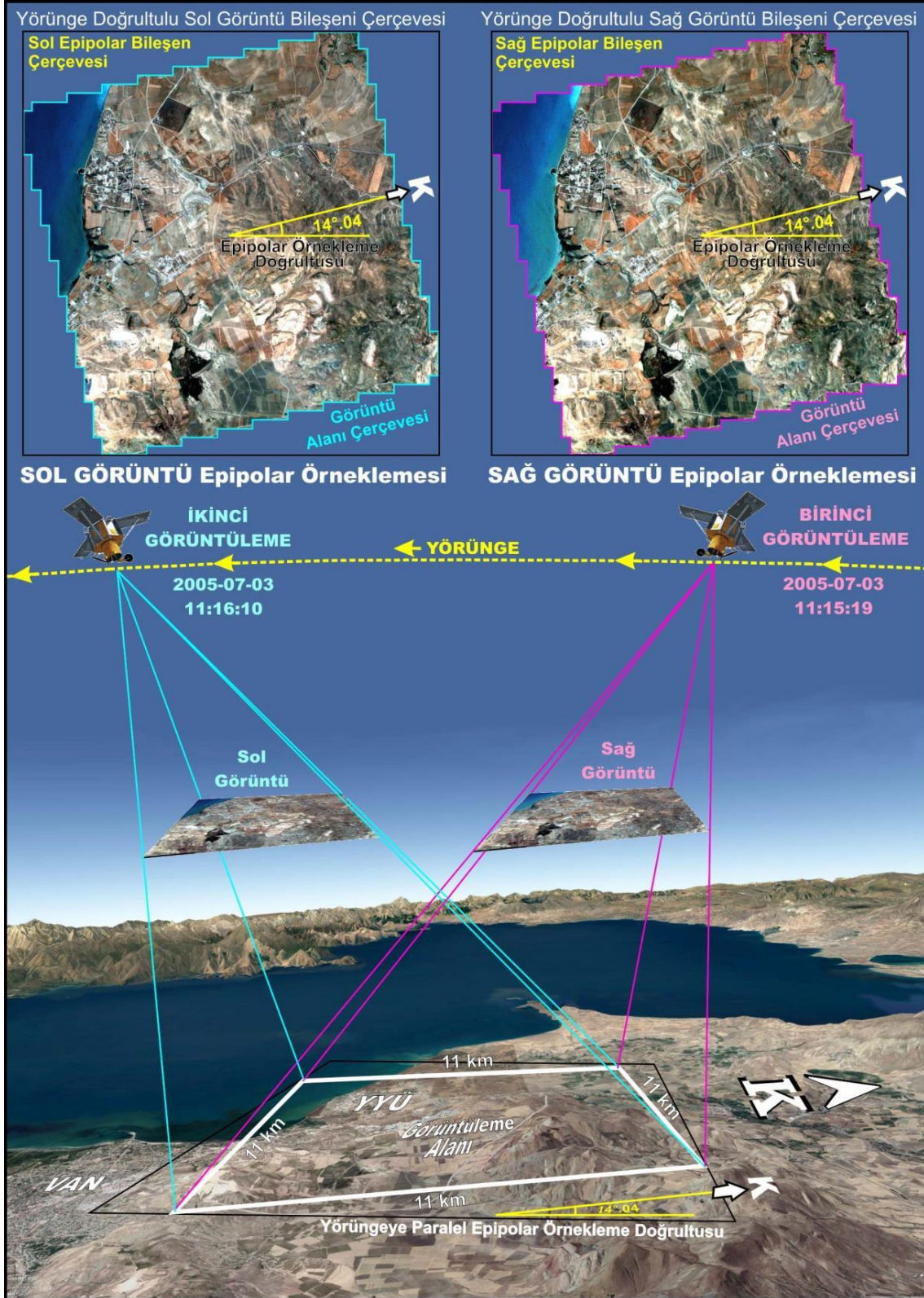
Şekil 6. Van YYÜ Kampüs Alanı İkonos uydu görüntülemesinin geometrik çözümlemesi. LR ve LL: Sağ ve sol görüntü uydu-hedef izdüşüm mesafesi; LOSR ve LOSL: sağ ve sol görüntü uydu-hedef bakış çizgisi; UR ve UL: sağ ve sol görüntüleme uydu konumu.



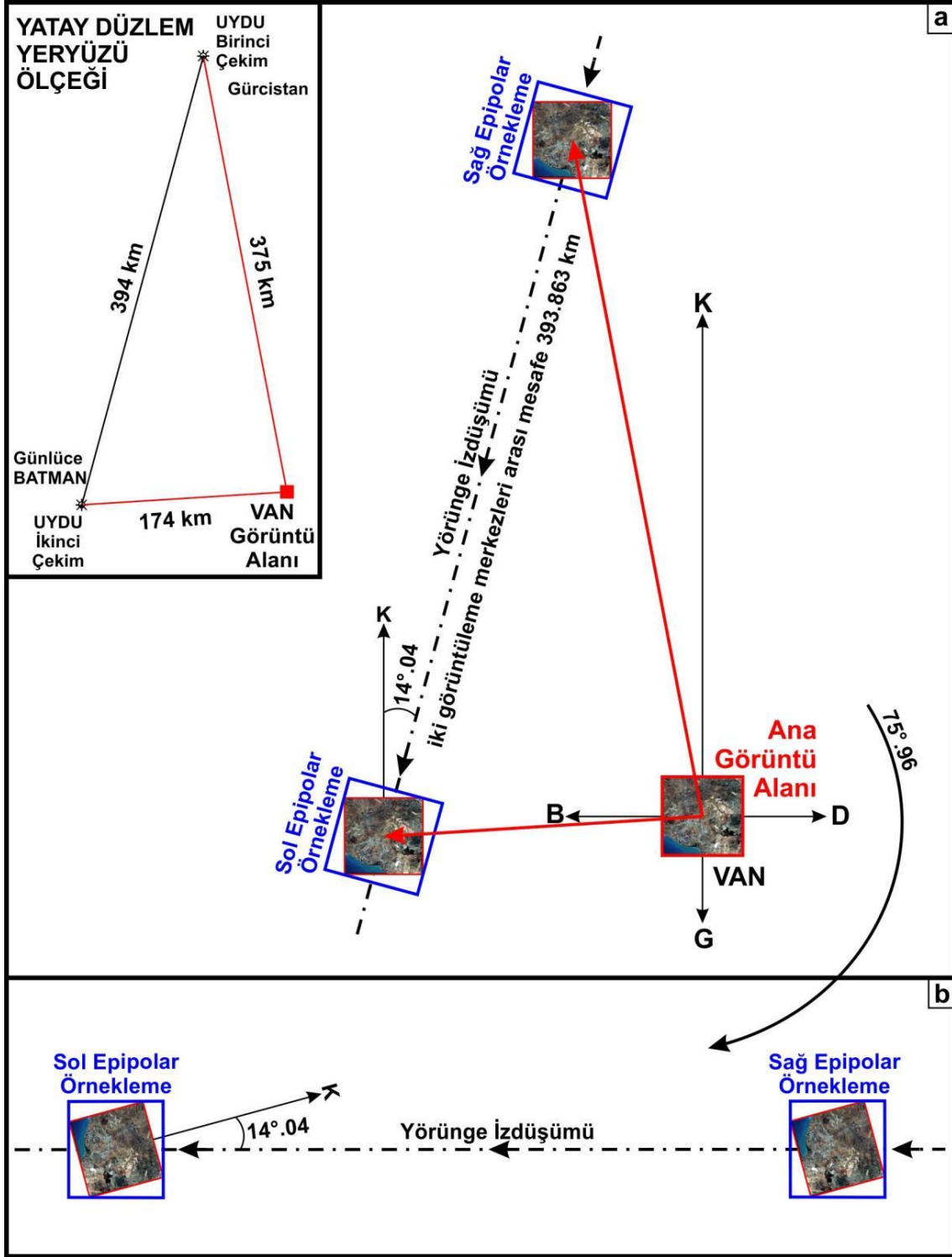
Şekil 7. Stereo-çift kaynak görüntüler. (a) Sağ bileşen; (b) sol bileşen (c) 1 m çözünürlükte yeniden örneklendirilmiş yer-atıflı sağ bileşen; (d) 1 m çözünürlükte yeniden örneklendirilmiş yer-atıflı sol bileşen.

Epipolar eşleme çalışması

Yapmış olduğumuz görüntüleme geometrisi çözümlemesi, her iki görüntünün çekimleri sırasında İkonos uydusunun gün-senkronizeli yörüngesinde yaklaşık kuzey-güney yönünde kutupsal iniş yaparken, yörünge izdüşümünün KKD – GGB doğrultusunda 14.04° olan bir azimut açısında (bknz. Şekil 6) olduğunu göstermektedir. Bu yörünge izdüşümü azimut açısı, aynı zamanda epipolar örneklemede ve eşleştirmede kullanılan epipolar doğrultu açısına karşılık gelmektedir. Bu nedenle, yaklaşık kuzey-güney doğrultusunda ilerleme yönüne ve buna 90° açıyla Doğu-Batı doğrultusunda taramaya sahip kamera bakışıyla alınmış olan stereo-çift görüntü bileşenleri (bknz. Şekil 7c ve 7d), sağ ve sol epipolar görüntü yeniden örnekleme yapılırken, kuzey ile 14.04° açı yapan bir çerçeveye yerleştirilmiştir (Şekil 8 ve 9).



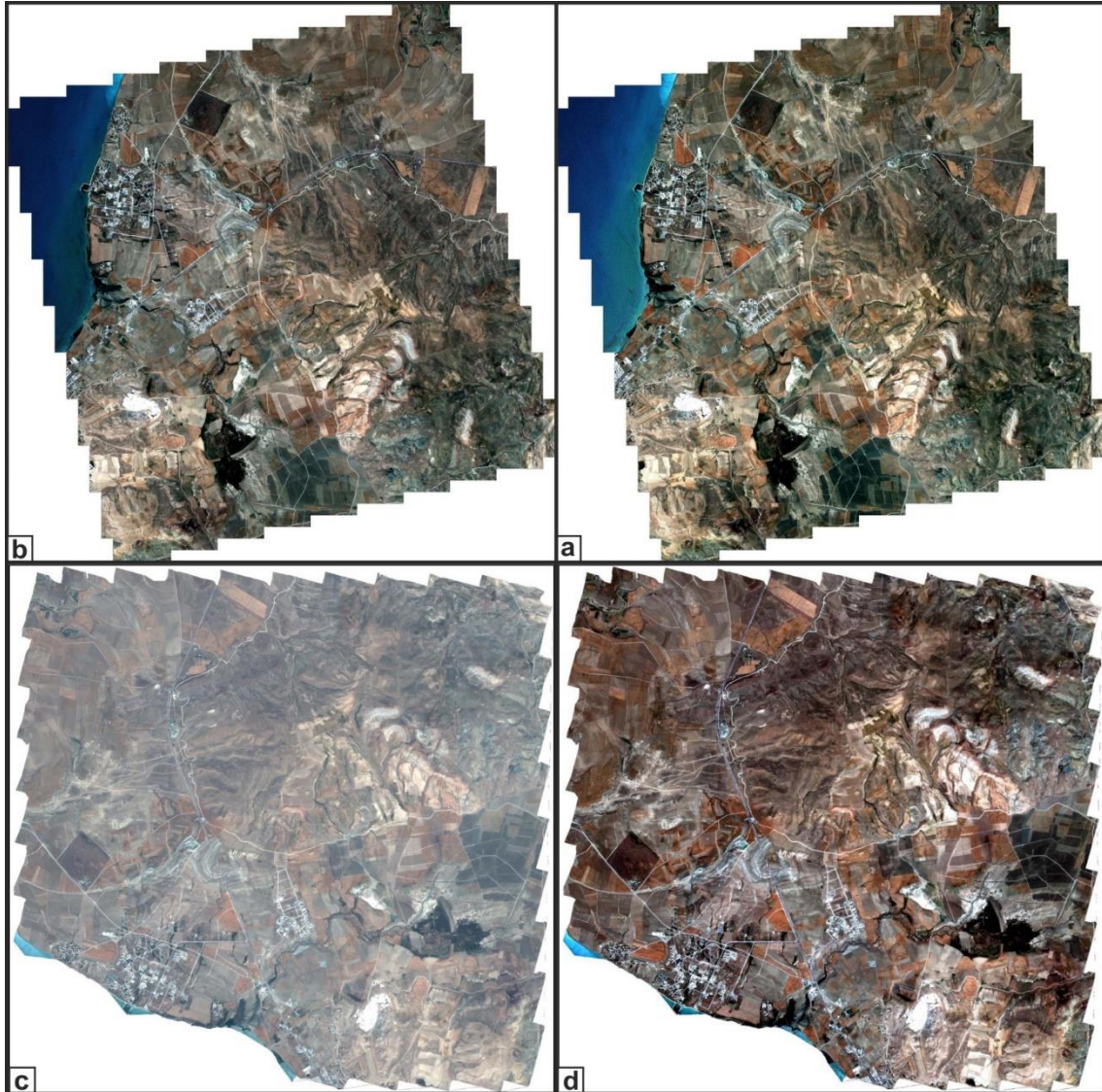
Şekil 8. Van YYÜ kampüs alanı çevresi İkonos uydusu epipolar görüntü eşleştirme düşey düzlem geometrik yaklaşımı (ölçeksiz; ayrıntı verebilmek için uydu konumları gerçek pozisyonlarına göreceyle yakınlaştırılmıştır).



Şekil 9. Van YYÜ kampüs alanı çevresi İkonos uydusu epipolar görüntü eşleştirme yatay düzlem geometrik çözümlemesi

Epipolar örnekleme çalışmasında 14.04° olan bir epipolar doğrultu açısına oturtulması için, stereo görüntü çifti bileşenlerinin, 75.96° açıyla saat yönünde döndürülmeleri öngörülmüştür (Şekil 9). Bu rotasyon, görüntülerin epipolar eşleşmesinde yörünge düzlemi üzerine aynı bakış açısıyla oturtulmasını sağlamıştır.

Epipolar sağ ve sol bileşen görüntülerin (Şekil 10a ve 10b) eşlemesiyle üretilen orto-görüntü (Şekil 10c ve 10d) ve sayısal yükseklik modeli (Şekil 11a) ilk aşamada WGS84 elipsoidinde coğrafi projeksiyonda 5 m çözünürlükle üretilmiştir. Verilerin, Harita Genel Müdürlüğü'nce üretilmiş olan ED50 elipsoidli UTM 38. zon projeksiyonundaki 1/25000 ölçekli paftanın topoğrafik verisiyle karşılaştırılması amacıyla, orto-görüntü ve sayısal yükseklik modeli ED50 elipsoidli UTM 38. zon projeksiyonunda yeniden örneklenmiştir.

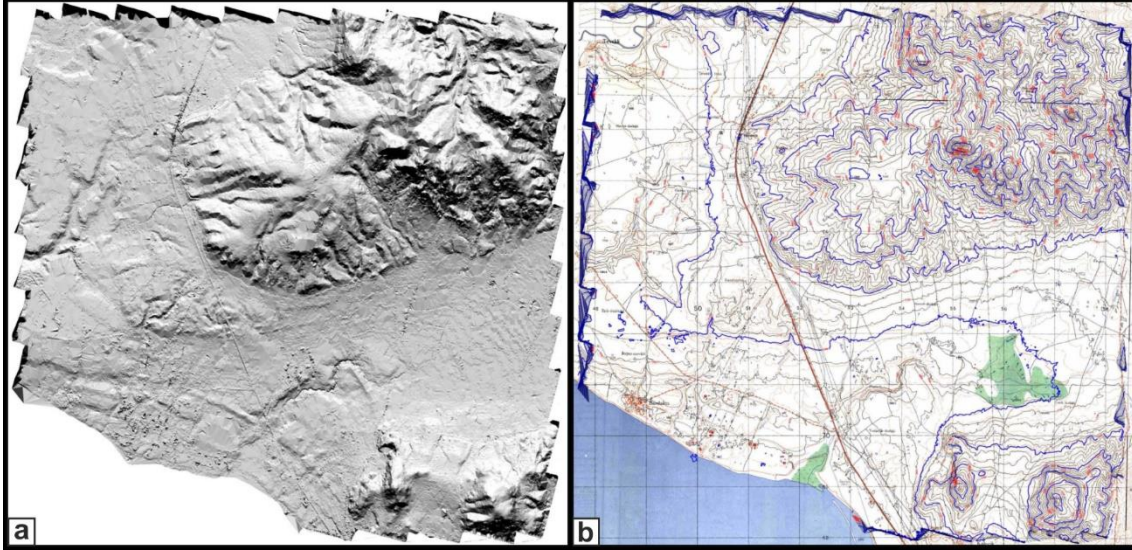


Şekil 10. Epipolar örnekleme görüntü bileşenleri ve orto-görüntü. (a) Epipolar görüntü sağ bileşeni; (b) epipolar görüntü sol bileşeni; (c) üretilen orto-görüntü ve (d) görüntü dinamiği ayarlanmış orto-görüntü.

Görüntü alanı sayısal yükseklik modeli

Orto-görüntü alanının tamamını kapsayacak şekilde oluşturulan sayısal yükseklik modelinin yapay ışıklandırmalı kabartı (rölyef) görüntüsü Şekil 11a'da sunulmuştur. Görüntülerin rektifikasyon çalışmasının doğruluğuna yönelik genel bir kıyaslama açısından, görüntü alanının içerisinde yer aldığı 1/25000 ölçekli K50-c4 topoğrafik paftası, görüntü alanının sınır koordinatlarını esas alacak şekilde kesilmiştir (Şekil 11b).

Yapılan görüntü çakıştırma işleminde orto-görüntünün topoğrafik haritayla alansal olarak bire-bir uyum sağladığı ve örtüştüğü görülmüştür (Şekil 11b). Üretilen sayısal yükseklik modeline ait eş yükseklik eğrilerinin topoğrafik harita eş yükseklik eğrileri ile şekilsel olarak uyumlu oldukları, buna karşılık yükseklik değerlerinin ise 20 m civarında daha yüksek değerler içerdiği belirlenmiştir.



Şekil 11. Üretilen sayısal yükseklik modelinin rölyef görüntüsü (a) ve 1/25000 ölçekli topoğrafik paftanın (K50-c4) eş yükseklik eğrilerinin karşılaştırmasını gösteren hibrid harita (b). Korelasyon dengelemesi sonrasında sayısal yükseklik modelinin eş yükseklik eğrileri her 10 m için ince siyah ve her 50 m için kalın lacivert çizgilerle gösterilmiştir.

Sayısal yükseklik modeline ilişkin yükseklik değerlerinin 1/25000 ölçekteki topografik pafta yükseklik değerlerine uyumunu sağlayacak dengeleme çalışmasına yönelik olarak, topografik pafta üzerinde kesin değer taşıyan nirengi noktaları kullanılmıştır. Bu amaçla görüntünün tamamını kapsayan alanda topografik pafta içerisinde bulunan 37 adet nirengi noktasının yükseklik değeri kullanılmıştır. Topografik haritadaki bu nirengi noktaları ile sayısal yükseklik modelindeki aynı koordinatta yer alan noktaların yükseklik değerlerinin karşılaştırmasıyla bir korelasyon fonksiyonu üretilmiştir ($Z_{yeni} = 1.006955179 * Z - 32.0279868$).

Sayısal yükseklik modelinin piksellerine atanmış yükseklik değerlerine (Z) uygulanan korelasyon fonksiyonu ile yapılan dengeleme, sayısal yükseklik modelinin topografik haritayla tamamen uyumlu hale gelmesine olanak sağlamıştır (Şekil 11b). Sayısal yükseklik modellemesinde, 37 nirengi noktasına karşılık gelen yükseklik değerlerinin farklarının dengeleme öncesindeki 19.54 m mertebesinde olan hata ortalaması, dengeleme sonrasında sıfıra yakın bir değer kazanmıştır.

Bu fonksiyonel dengeleme çalışmasının görüntü alanı geneline yayılı bir uyum sağlaması, asıl inceleme alanı olan kampüs sahasına (Şekil 12) yönelik 1 m çözünürlükte ayrıntılı çalışma yaparken, topografik olarak çevresine göre daha basık olan kampüs alanı içerisinde yer alan nirengi noktalarının kullanılarak söz konusu alana özgün olan bir korelasyon fonksiyonunun uygulanabileceğini de göstermiştir.

Kampüs alanı sayısal yükseklik modeli

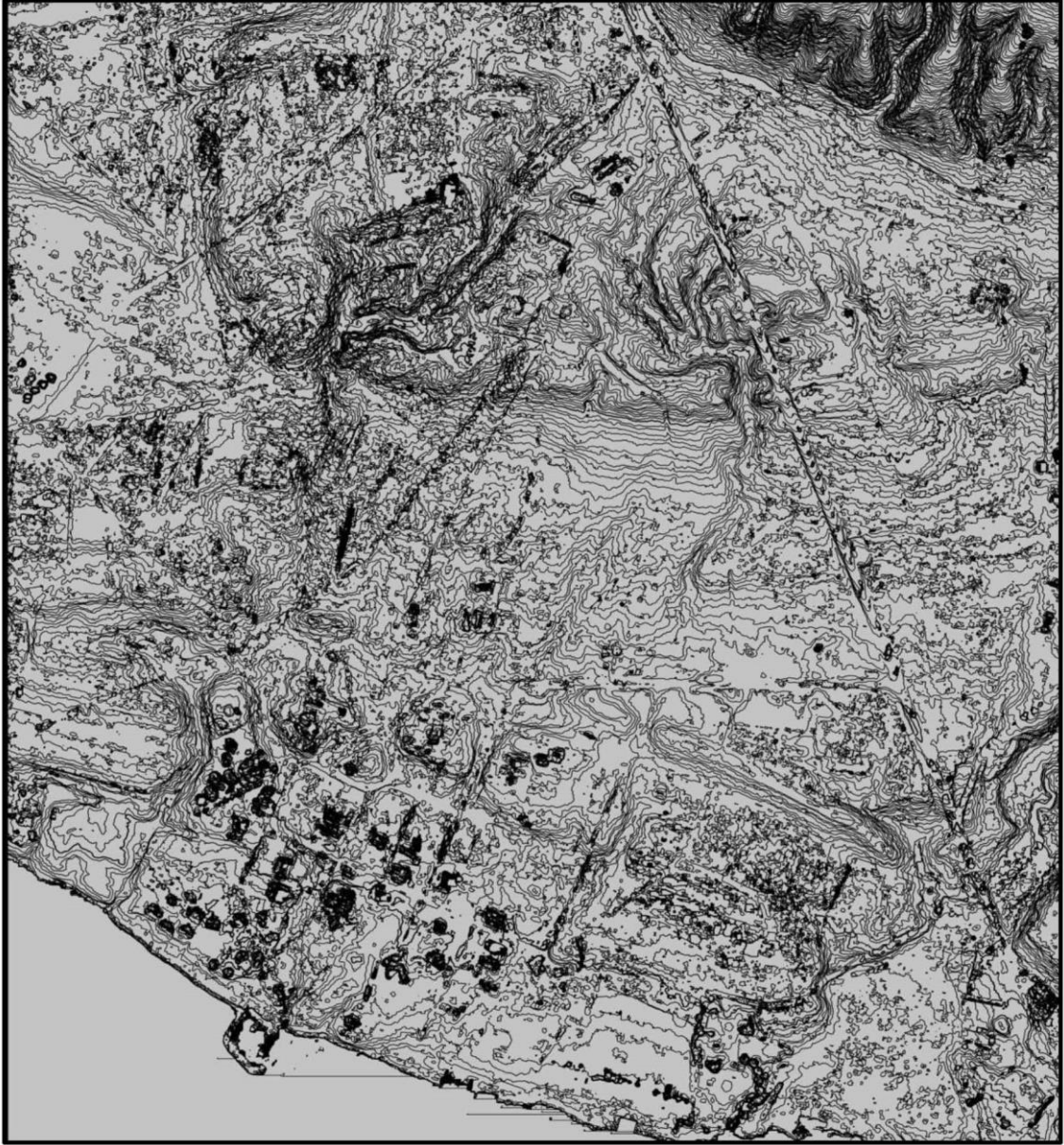
İkinci aşamada Van YYÜ kampüs alanına ilişkin orto-rektifikasyon çalışması ile İkonos görüntüsünün bütünsel alanı üzerinden 1 m çözünürlükte orto-görüntü ve sayısal yükseklik modeli oluşturulmuştur. Bu orto-görüntü ve sayısal yükseklik modeli, inceleme alanının sınırları çerçevesinde kesilerek ayrıntılı değerlendirmeye alınmıştır (Şekil 12).



Şekil 12. İnceleme alanının görüntü dinamiği ayarı yapılmış orto-görüntüsü (a) ve inceleme alanına yönelik korelasyon fonksiyonu için seçilen nirengi noktalarının topografik harita üzerinde gösterimi (b).

Van YYÜ Kampüs alanının sayısal yükseklik modeline ilişkin yükseklik değerlerinin 1/25000 ölçekteki topografik pafta yükseklik değerlerine uyumunu sağlayacak dengeleme çalışmasına yönelik olarak, yine topografik pafta üzerinde kesin değerler taşıyan nirengi noktaları kullanılmıştır. Bu amaçla inceleme alanının topografik haritası içerisinde bulunan 10 adet nirengi noktası çalışmada kullanılmak üzere belirlenmiştir (Şekil 12b). Bununla birlikte, bu nirengi noktalarından N02, N04 ve N10 üzerine sonradan bina inşa edilmiş olduğu için çalışmada kullanılmayacakları anlaşılmıştır. Topografik haritadan seçilen nirengi noktalarından geriye kalan 7 adeti ile sayısal yükseklik modelindeki aynı koordinatlarda yer alan noktaların yükseklik değerlerinin karşılaştırması yapılmış ve kampüs alanına özgü bir korelasyon fonksiyonu üretilmiştir ($Z_{yeni} = 1.022807056 * Z - 62.40196697$).

Kampüs alanı sayısal yükseklik modelinin piksellerine atanmış yükseklik değerlerine (Z) korelasyon fonksiyonu ile yapılan dengeleme, sayısal yükseklik modelinin topografik haritada mevcut olan nirengi noktalarıyla yüksek düzeyde uyumlu hale gelmesine olanak sağlamıştır. Kampüs sahası sayısal yükseklik modellemesinde kullanılan 7 nirengi noktasına karşılık gelen yükseklik değerlerinin farklarının dengeleme öncesindeki 23.71 m mertebesinde olan hata ortalaması, dengeleme sonrasında 0.46 m gibi oldukça düşük bir değer kazanmıştır. Bu fonksiyon uygulamasıyla Van YYÜ kampüs alanı için yüzey topoğrafyasına ince hassasiyet gösteren 1 m çözünürlükte bir sayısal yükseklik modeli üretilmiştir (Şekil 13).



Şekil 13. İnceleme alanı için üretilen 1m çözünürlüklü sayısal arazi modeli ve 1 m aralıklı eş yükseklik eğrileri.

Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi kampüs alanı ve yakın çevresine ilişkin çok yüksek çözünürlüklü bir sayısal yüzey modeli oluşturmak amacıyla, pasif uydu sistemi tabanlı yüksek çözünürlüklü bir stereo görüntü çifti olarak, İkonos uydusunun Precision Stereo 1m Pan-Sharpned görüntü çifti değerlendirmeye alınmıştır. Stereo görüntü çiftinden itibaren sayısal yükseklik modeli oluşturmanın ana koşulu olan epipolar eşey görüntü örnekleme ve epipolar eşleme uygulaması yaparak sayısal yükseklik modeli oluşturmak için, jeomatik veri işlenimine yönelik geliştirilmiş tam modüllü PCI-Geomatica yazılımı kullanılmıştır.

Stereo-çift kaynak görüntülerle birlikte temin edilen rasyonel polinomal katsayılar (RPC) modelini esas alan rasyonel fonksiyon modeli (RFM) ile piksel konumlarının

keskinleştirilmesine ilişkin modülasyon transfer fonksiyonu dengelemesi (MTFC) işlemine alınan stereo görüntü çifti, yapılan dengeleme çalışması sonrasında rektifiye edilmiş ve 1 m çözünürlükte yeniden örneklendirilmiştir. Epipolar örnekleme sonrasında kampüs alanının orto-görüntüsü ve çok yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modeli oluşturulmuştur.

Van YYÜ kampüs alanı ve yakın çevresine yönelik üretilen yükseklik modeli, Harita Genel Müdürlüğü tarafından üretilen 1/25000 ölçekli K50-c4 paftasının yükseklik değerleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışmada üretilen sayısal yükseklik modelinin piksel yükseklik değerlerinde topografik paftanın geneline yayılmış olarak +20 m civarı yükseklik farkı olduğu görülmüştür. Bunun üzerine, topografik haritanın genelinden daha yüksek doğruluğa sahip olan nirengi noktaları kullanılarak, sayısal yükseklik modelini topografik harita ile ilişkilendiren bir korelasyon fonksiyonu oluşturulmuş ve sayısal yükseklik modeline uygulanmıştır. Bu topografik dengeleme uygulaması sonrasında, topografik harita eş yükseklik eğrilerinin değerleri ile sayısal yükseklik modelinin piksel yükseklik değerleri arasındaki farklar harita genelinde 1 m'nin altına indirgenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Van YYÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'nin 2002-MİM-111 no'lu projesinin desteğinde gerçekleştirilmiştir. Birime şükranlarımı sunar, bilim ve değerlendirme komisyonlarıyla birlikte tüm çalışanlarına teşekkür ederim. İki hakemimiz, makalenin yayına hazırlanmasına çok verimli bir katkı sağlamışlardır, kendilerine müteşekkirim.

Kaynaklar

- Curlander, J.C. and McDonough, R.N. (1991). *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*, John Wiley, New York, USA, 647 pp.
- Di, K., Ma, R. and Li, X.R. (2003a). Rational functions and potential for rigorous sensor model recovery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v69, n1, pp. 33-41.
- Di, K., Wang, J., Ma, R. and Li, R. (2003b). Automatic shoreline extraction from high-resolution Ikonos satellite imagery. *ASPRS 2003 Annual Conference Proceedings*, May 2003, Anchorage, Alaska, USA.
- Dial, G. and Grodecki, J. (2002). Block adjustment with rational polynomial camera models. *Proceedings of the ACSM-ASPRS 2002 Annual Conference*. 22-26 April, Washington DC (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland), unpaginated CD-ROM.
- ESA, (2006). *Ikonos imagery products guide*, Version 1.5. Erişim tarihi: 01.01.2006, <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/IKONOS-Imagery-Product-Guide.pdf>
- Ezekiel Enterprises, LLC. (2018). *Satellite Photogrammetry: Course-LS1007 (Approved continuing education for licensed Professional engineers & land surveyors)*. Erişim tarihi: 11.09.2018, <https://ez-pdh.com/course-material/LS1007-Satellite-Photogrammetry.pdf>
- Fraser, C.S. and Hanley, H.B. (2005). Bias-compensated RPCs for sensor orientation of high-resolution satellite imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71, 8, 909-915.

- GeoEye, (2006). *Ikonos imagery products guide*, Version 1.5. Dulles, Virginia, USA.
- Graham, L.C., (1974). Synthetic interferometer radar for topographic mapping. *Proceedings IEEE*, 62, 763-768.
- Grodecki, J. and Dial, G. (2001). Ikonos geometric accuracy. *Proceedings of Joint International Workshop on High Resolution Mapping from Space*, 19-21 September 2001, Hannover – Germany, pp. 77-86.
- Grodecki, J. (2001). Ikonos stereo feature extraction - RPC approach, *ASPRS 2001 Proceedings*, 23-27 April 2001, St. Louis, MO.
- Köse, O., Kasapoğlu, K.E. ve Eren, T. (1997). Değişik ölçek tabanlı sayısal arazi modellerinde dokusal farklılıklar. G. Günay, M. Önder, U. Narlı, Ö. Atilla, A. Karabulut (Ed.), *Uzaktan Algılama ve Türkiye'deki Uygulamaları Semineri Bildiriler Kitabı*, (VII/56-VII/63). 16-18 Mayıs 1997, Bursa., Türkiye.
- Köse, O. ve Özkaymak, Ç. (2002). Van şehri kuzeyi genç göl çökellerinde aktif tektonik bulgular. *ATAG-6 (Aktif Tektonik Araştırma Grubu 6. Toplantısı)*. Bildiri Özleri Kitabı, 64-65. 21-22 Kasım 2002, MTA Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.
- Köse, O. (2019). YYÜ Kampüs alanı ve çevresinin mühendislik uygulamalarının yer seçimi optimizasyonuna yönelik çok yüksek çözünürlüklü sayısal yüzey modellemesinin oluşturulması. O. Köse (Yürütücü), *2002-MİM-111 no'lu Münferit Araştırma Projesi Raporu*. Van YYÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, Van, Türkiye.
- Kramer. H.J. (2002). *Observation of earth and its environment: survey of missions and sensors*. 4th Edt. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 1509 p.
- Li, R., Di, K. and Ma, R. (2003). 3-D Shoreline extraction from Ikonos satellite imagery. *Marine Geodesy*, 26:107-115
- Lliboutry, L., (1992). *Sciences Géométriques et Télédétection*. Masson, 289 p.
- Massonnet, D. (1993). Displacements fields mapped by radar interferometry. *Proceedings of the CRCM*, December 6-11, Kobe, 139-145.
- Massonnet, D. and Feigl, K. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36, 4, 441-500.
- Mouginis-Mark, P.J. and Garbeil, H. (1993). Digital topography of volcanoes from radar interferometry: An Example From Mt. Vesuvius. *Bulletin of Volcanology*, 55, 566-570.
- Nordmann, A. (2008). Contribution in article “Epipolar Geometry” of Wikipedia by user name norro. https://en.wikipedia.org/wiki/Epipolar_geometry.
- Oh, J. (2011). *Novel Approach to Epipolar Resampling of HRSI and Satellite Stereo Imagery-based Georeferencing of Aerial Images*. PhD Thesis. Graduate Program in Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, USA. 213 p
- Örçen, S., Tolluoğlu, A.Ü., Köse, O., Yakupoğlu, T., Çiftçi, Y., Işık, A., Selçuk, L., Üner, S., Özkaymak, Ç., Akkaya, İ., Özvan, A., Sağlam, A., Baykal, M., Özdemir, Y., Üner, T., Karaoğlu, Ö., Yeşilova, Ç. ve Oyan, V. (2004). Van şehri kentleşme alanlarında yüzeyleyen Pliyo-Kuvaterner çökellerinde sedimantolojik özelliklerin ve aktif tektonizmanın deprenselliğe yönelik incelemesi. S. Örçen (Yürütücü), *YDABAG-101Y100 no'lu TÜBİTAK- VAP (Van Araştırma Projesi) Proje Raporu*. TÜBİTAK, Ankara, Türkiye.
- Özkaymak, Ç. ve Köse, O. (2002). Van ili ve yakın civarı aktif tektoniğine yönelik bulgular. *55. Türkiye Jeoloji Kurultayı*. Bildiri Özleri Kitabı, 226-227. 11-15 Mart 2002, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, Ankara, Türkiye.

- Özkaymak, Ç. (2003). *Van şehri yakın çevresinin aktif tektonik özellikleri*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Van, Türkiye.
- Özkaymak, Ç., Sağlam, A. ve Köse, O. (2003). Van Gölü doğusu aktif tektonik özellikleri. *ATAG-7 (Aktif Tektonik Araştırma Grubu 7. Toplantısı)*. Bildiri Özleri Kitabı, 16-17. 01-03 Ekim 2003, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye.
- Özkaymak, Ç., Yürür, T. and Köse O. (2004). An example of intercontinental active collisional tectonics in the Eastern Mediterranean region (Van, Eastern Turkey). A.A. Chatzipetros & S.B. Pavlides (Ed), *Proceedings of 5th ISEMG - International Symposium On Eastern Mediterranean Geology*. (v. 1, p. 153-156). 14-20 April 2004, Thessaloniki – Greece.
- Thoué, F. (1993). *Quantification Par Imagerie Tridimensionnelle De L'Extansion Continentale Et Des Déplacements Associés: Exemples Au Kenya Et Au Yémen*. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier (Grenoble 1), France, 200 p
- Wikipedia contributors. (2024). Epipolar geometry. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 03:19, March 12, 2024, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Epipolar_geometry&oldid=1213211748
- Yılmaz, A., Yıldız, F., Yakar, M. ve Mutluoğlu, Ö. (2007). Stereo İkonos uydu görüntülerinin 3B konumlandırma doğruluğunun araştırılması. *TUFUAB IV. Teknik Sempozyumu*, 5-7 Haziran 2007, İstanbul, Türkiye
- Zebker, H.A. and Goldstein R.M. (1986). Topographic mapping from Interferometric Synthetic Aperature Radar observations. *J. Geophys. Res.* 91,4993-4999.
- Zebker, H.A., Madsen, S.N., Wheeler K.B., Miller, T., Lou, Y., Albaerti, G., Vetrilla, S., and Cucci, A. (1992). The TOPSAR interferometric radar topographic mapping instrument. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*. 30, 5, 933- 940.