

## OTOMATİK ÜÇ BOYUTLU BİNA MODELLEMESİ İÇİN BİR YAKLAŞIM

E. Sümer<sup>1</sup>, M. Türker<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Başkent Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 06530, Ankara. esumer@baskent.edu.tr

<sup>2</sup>Hacettepe Üniversitesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, 06800 Beytepe, Ankara. mturker@hacettepe.edu.tr

### ÖZET

*Bu çalışmada, üç boyutlu (3-b) bina modellerinin otomatik olarak oluşturulmasına yönelik bir yapı geliştirilmiştir. Önerilen yapının temel yaklaşımları şu şekildedir: Önce, 1-m çözünürlüklü keskinleştirilmiş uydu görüntüsünden genetik algoritma tabanlı bir yaklaşım ile bina bölgeleri çıkarılmakta, elde edilen ikili görüntüler morfolojik görüntü işleme fonksiyonları ile iyileştirilmekte ve bina sınırları matematiksel görüntü fonksiyonları ile bulunmaktadır. Elde edilen bina sınırlarından 3-b katı modellerin oluşturulabilmesi için Normalleştirilmiş Sayısal Yüzey Modeli (nDSM) kullanılmaktadır. Diğer taraftan, oluşturulan 3-b katı modellerin gerçeklik düzeyinin artırılmasına yönelik olarak bina cephelerine ait doku bilgisi, otomatik bir yaklaşımla çıkarılmaktadır. Bunun için çekilen bina cephe fotoğrafları dört farklı işlemde geçirilerek 3-b modele kaplanacak hale getirilmektedir. İlk işlem olarak, bina cephe dokusu, çekilmiş olan fotoğraf içerisinde watershed bölütleme algoritması ile tespit edilmektedir. İkinci işlem olarak, elde edilen bina cephe görüntüsünün geometrik rektifikasyonu otomatik olarak yapılmakta ve böylelikle çekim açısı ve uzaklığa bağlı geometrik bozulmalar belirli bir düzeye indirgenmektedir. Üçüncü aşamada ise rektifiye edilmiş cephe dokusunu kapatan engeller otomatik olarak giderilmektedir. Çalışmanın son bölümünde, oluşturulan 3-b bina modelleri üretilen bina cephe dokuları ile kaplanmaktadır. Bunun için, hangi cephe dokusunun hangi bina cephesi ile ilişkilendirileceğini bulan GPS destekli bir yaklaşım geliştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşımlar, Ankara'nın Batıkent bölgesinden seçilen farklı test alanlarında uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; bina bölgeleri %93'lük uygunluk değeri, bina sınırları ise ortalama 4 m hata payı ile tespit edilmiştir. Bina cephe bölgelerinin çıkarılma başarısı ise yaklaşık %80-%85 aralığında bulunmuştur. Bina cephe dokularının rektifikasyonundaki hata aralığı binaların %60'ı için 10 pikselin altında kalmıştır. Son olarak, engellerden arındırılmış bina cephe dokusunun kalitesinin ölçülmesine yönelik yapılan teste, 1 (yüksek kalite) – 6 (düşük kalite) aralığında, ortalama 2.58'lik bir kriter puanı hesaplanmıştır. Elde edilen tüm sonuçlar irdelendiğinde çalışmanın tatmin edici düzeyde bir başarıya sahip olduğu görülmektedir.*

**Anahtar Sözcükler:** Bina Tespiti, Cephe Dokusu, Geometrik Rektifikasyon, Engel Giderme, 3-B Modelleme

### AN APPROACH FOR AUTOMATIC 3-D BUILDING MODELING

#### ABSTRACT

*In this study, an automated 3-d building modeling framework is developed. The fundamental approaches of the proposed framework are as follows: First, the building boundaries are detected from the 1-m resolution pan-sharpened satellite imagery automatically. To do that, the building regions are extracted by a genetic algorithm based approach as a first step. Then, the enhancement step is performed using morphological image processing functions. Last, the boundaries are found by mathematical image processing functions. In order to generate 3-d solid models from 2-d building boundaries, normalized digital surface model is employed. On the other hand, the building façade textures are extracted by an automated approach aiming to improve the level of the reality of the previously generated 3-d solid models. This is performed by applying four different steps to ground level building façade images to be mapped onto the 3-d models. The first step consists of building façade texture detection within the façade photo by using watershed segmentation algorithm in an iterative manner. Secondly, the automated geometric rectification of the extracted building façade images is carried out. In this way, some geometric distortions based on shooting angle and distance, are reduced to a certain level. In the third and the last step, an approach based on the removal of the occlusions that block the façade textures, is developed. In the final stage of the study, the mapping of 3-d building models using the extracted building façade textures is performed. To do that, a GPS-assisted approach that associates the extracted façade textures with the corresponding building façades is developed. The developed approaches are applied to different building blocks selected from Batıkent district of Ankara. According to experimental results; building regions are extracted with a fitness value of 93% and building delineation accuracy is found to be 4 meters, in average. The success rate of the building façade extraction is computed within 80% and 85%. The rectification errors of the building façade textures are found to be less than 10 pixels for the 60% of the buildings being analyzed. Finally, a criterion score of 2.58 is computed in the assessment of the occlusion-free building façade texture quality, where the criterion score of 1 corresponds to highest and 6 refers the lowest qualities, respectively. The overall results reveal that the study is proved to be quite successful.*

**Keywords:** Building detection, facade texture, geometric rectification, occlusion removal, 3-d modeling

## 1. GİRİŞ

“Görsellik” kavramı bilgi teknolojisindeki hızlı gelişmeler ile yeni bir boyut kazanmıştır. Üç boyutlu (3-b) modelleme başta bilgisayar grafiği olmak üzere görüntü işleme ve uzaktan algılama alanlarında çalışan birçok araştırmacının ilgi odağı haline gelmiştir. Objelerin 3-b olarak görselleştirilmesi ile insanların algılama yetenekleri büyük ölçüde artmıştır. Bunun sonucunda; savunma sistemleri, turizm, arkeoloji, oyun teknolojileri ve daha birçok alanda önemli gelişmeler meydana gelmiştir. Bu gelişmelerden önemli ölçüde etkilenen alanlardan biri de Coğrafi Bilgi Teknolojileri olmuştur. Sanal gerçeklik kavramı ile bilgisayar ortamında yaratılmış dünyalar içerisindeki coğrafi objelere farklı perspektiflerden bakabilme ve hatta bunlar arasında gezinti ve uçuşlar yapabilme imkânı doğmuştur. Oluşturulan bu sanal dünyaların en önemlilerinden biri de sanal şehirlerdir. Sanal şehirlerde arazi, bitki örtüsü, bina ve yol gibi temel nesnelere yer alırken, özellikle binalar, CBS için temel bir veri kaynağı olup şehir planlamasında, altyapı gelişiminde, haberleşme hatlarının kurulumunda, doğal afet planlamasında ve benzeri birçok kentsel uygulamada da kullanılmaktadır. Oluşturulan bina modellerinin daha gerçekçi bir biçimde görselleştirilebilmesi için gerçekçi bina cephe dokularının elde edilmesi ve model üzerine kaplanması da oldukça önem arz etmektedir.

Binaların üç boyutlu olarak modellenmesinde farklı veri kaynaklarının kullanıldığı birçok çalışma literatürde yer almaktadır. Bunlardan Kim and Nevatia (2004), Peng and Liu (2005), Lu et al. (2006) ve Ahmadi et al. (2010) tekli, çoklu ya da bindirilmiş hava fotoğraflarından üç boyutlu bina modellemesini gerçekleştirmişlerdir. Diğer taraftan, Rottensteiner (2003), Cho et al. (2004), Wang et al. (2006) ve Zhang et al. (2006) havasal lazer tarayıcıdan (LIDAR) üretilen nokta bulutu verilerini kullanarak binaları 3-b olarak modellemişlerdir. Farklı veri kaynaklarının bütünleştirilerek ya da kaynaştırılarak kullanıldığı bazı çalışmalar ise Sohn ve Dowman (2007), Lee et al. (2008), Vu et al. (2009) ve Karantzalos and Paragios (2010) tarafından gerçekleştirilmiştir. Öte yandan, üç boyutlu bina modellerine ait cephe dokularının elde edilmesine yönelik çalışmalarda yersel optik kayıt sistemleri ve lazer tarayıcılara (LIDAR) sıkça rastlanırken, bindirilmiş hava fotoğraflarının kullanımı da görülmektedir. Yakın zamanda yapılan çalışmalardan Laycock et al. (2007), Poullis and You (2009), Hoegner and Stilla (2009) ve Tian et al. (2010) yerden çekilmiş tekli görüntü veya video verilerinden bina cephe dokularını çıkarmışlardır. LIDAR verisini kullanarak doku çıkarımını gerçekleştiren çalışmalardan bazıları Frueh and Zakhor (2003), Böhm (2008), Carlberg et al. (2008) ve Pu and Vosselman (2009) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmaların bazılarında bina cephelerini kapatan engellerin giderilmesine yönelik bir takım yaklaşımlar da geliştirilmiştir. Öte yandan, bina cephe dokusu çıkarımında bindirilmiş hava fotoğraflarının kullanımına çok fazla rastlanmamaktadır.

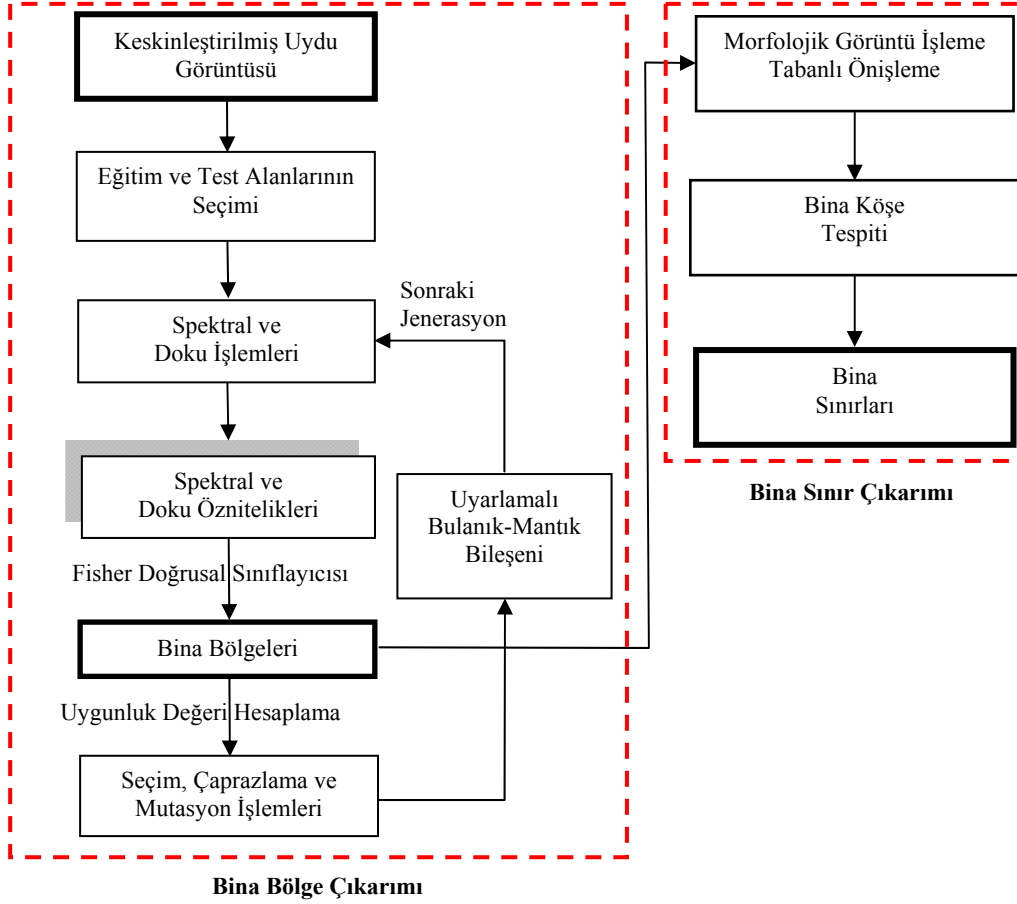
Bu çalışmada, uydu ve yer seviyesinden çekilmiş görüntülerden otomatik 3-b bina modellemesi yapmak için bütünleşik bir yapı önerilmiştir. Yapı üç temel yaklaşımdan oluşmaktadır. Önce, yüksek çözünürlüklü keskinleştirilmiş uydu görüntülerinden genetik algoritma tabanlı bir yaklaşım ve ikili görüntü özellikleri kullanılarak bina bölgeleri ve sınırları tespit edilmiştir. Sonra, yerden çekilmiş bina görüntülerinden fotogerçekçi cephe dokularının otomatik olarak elde edilmesi için bir yaklaşım geliştirilmiştir. Son olarak, 3-b bina modellerinin üretilmesi, doku seçimi ve doku kaplaması işlemleri gerçekleştirilmiştir. Önerilen yaklaşım Ankara'nın Batıkent bölgesinden seçilen farklı site alanlarına uygulanmıştır. Üretilen dokuların modele kaplanması sanal gerçeklik modelleme dili (VRML) ile gerçekleştirilmiş olup diğer tüm işlemler için MATLAB programlama dili kullanılmıştır.

## 2. BİNA SINIRLARININ UYDU GÖRÜNTÜSÜNDEN TESPİTİ

Önerilen yaklaşımın ilk adımında bina bölgeleri ve sınırları çıkarılmıştır. Bina bölgelerinin çıkarımı için Perkins et al., (2000) tarafından öngörülen genetik algoritma tabanlı bir görüntü işleme yöntemini (GENIE) temel alan bir yaklaşım kullanılmıştır (Şekil 1). Buna göre popülasyon, sayısı belli olan bir dizi kromozomun gelişigüzel olarak yaratılmasıyla oluşmaktadır. Kromozom yapısı içerisindeki her bir gen ise yine rasgele belirlenen birer görüntü işleme fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Bu fonksiyonlardan bazıları aritmetik, mantıksal ve eşik değeri işlemleri iken bazıları ise spektral benzerlik, spektral mesafe ve spektral açı ile birlikte doku işlemlerinden meydana gelmektedir.

Geliştirilen yaklaşımda öncelikle, keskinleştirilmiş uydu görüntüsü üzerinde bina ve bina olmayan piksellerden eğitim ve test alanları seçilmektedir. Bu işlemin ardından, önceden gelişigüzel oluşturulmuş popülasyon içerisinde yer alan her bir kromozomdaki genler (spektral ve doku işlemleri)

orijinal görüntüye uygulanır. Üzerinde işlem yapılacak girdi bantları ile işlemin uygulanmasından sonra elde edilecek olan çıktı bantlarının seçimi gelişigüzel olarak genetik algoritma tarafından belirlenir. Çıktı bantları o kromozomun spektral ve doku özneliklerini barındırır. Çıktı bantlarının elde edilmesinden sonra bu bantlar Fisher doğrusal sınıflayıcısı ile tek bir banda indirgenir. Bu işlem, daha önceden belirlenmiş eğitim alanlarını kullanarak orijinal görüntünün bina ve bina olmayan piksellere göre ikili bir sınıflandırmaya tabi tutulmasına olanak verir. Sınıflandırılan görüntü en uygun eşik değerine göre ikili görüntüye dönüştürülerek, her bir kromozom için, bina bölgeleri çıkarılmış olur.



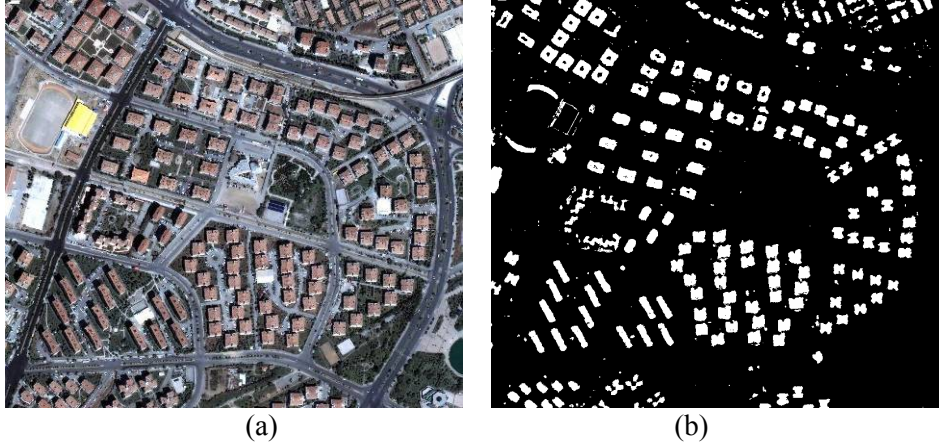
**Şekil 1.** Bina bölgeleri ve sınırlarının çıkarımı için geliştirilen yaklaşımın işlem adımları

Bir sonraki adımda, bina tespitini hangi kromozomun ne derece doğru yaptığını ölçen uygunluk değerleri hesaplanır. Bu değerler hesaplanırken bina ve bina olmayan alanlar üzerinde önceden belirlenmiş olan test bölgeleri kullanılır. İlgili jenerasyondaki en yüksek uygunluk değerine sahip kromozom “elit kromozom” olarak adlandırılır ve bu kromozom diğer jenerasyona doğrudan aktarılır. Her bir kromozomun uygunluk değerinin hesaplanmasının ardından bir sonraki jenerasyona aktarılacak kromozomlar çaprazlama ve mutasyon işlemleri ile seçilir.

Bu işlemlerin amacı, popülasyondaki belirli sayıda kromozom üzerinde gen çeşitliliği yaratarak sonraki jenerasyonlar için elit kromozomdan daha yüksek uygunluk değerlerine sahip yeni kromozomların üretilmesine çalışmaktır. Sonrasında, çaprazlama ve mutasyon işlemlerini daha verimli kılabilmek amacıyla bir “uyarlamalı bulanık-mantık” bileşeni kullanılır. Burada, şimdiki ve bir önceki jenerasyonların ortalama ve en büyük uygunluk değerleri kullanılarak bir sonraki jenerasyonda kullanılacak en uygun çaprazlama ve mutasyon olasılıkları hesaplanır. Böylece genetik algoritmanın daha başarılı bir sonuca daha az döngüde gitme olasılığı artırılmış olur.

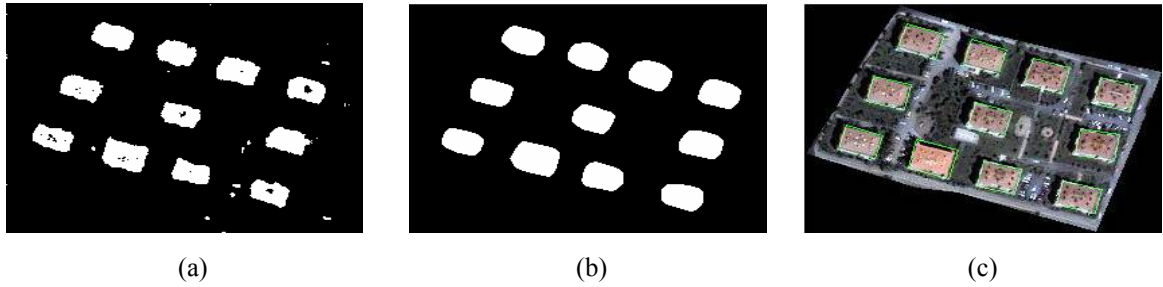
Bu evrimsel süreç belirli bir döngü yapısı içerisinde devam eder ve her jenerasyonda bir öncekine göre daha yüksek uygunluk değerine sahip elit kromozomların elde edilmesi beklenir. Ancak jenerasyonlar ilerledikçe yeni elit kromozomların oluşmaması veya değişimin çok seyrek aralıklarla gözlenmesi algoritmanın belli bir bütünsel veya lokal çözüme doğru yakınsadığını gösterir. Bu

durumda algoritmanın durdurulması gerekir. Bu çalışmada, genetik algoritmanın yakınsama koşulu olarak sabit bir jenerasyon sayısı alınmıştır. Geliştirilen yaklaşımın uydu görüntüsüne uygulanması sonucunda elde edilen bina bölgeleri (beyaz) Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2. (a) Uydu görüntüsü ve (b) çıkarılmış bina bölgeleri

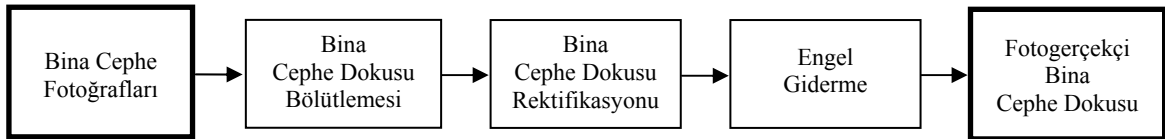
Bina bölgelerinin tespit edilmesinin ardından bina sınırlarının çıkarımı, Şekil 1’de yer alan ilgili işlem adımları ile gerçekleştirilmiştir. Buna göre, tespit edilmiş olan bina bölgeleri öncelikle morfolojik görüntü işleme fonksiyonları kullanılarak iyileştirilmiştir. Bu fonksiyonlar morfolojik açma (opening), doldurma (hole filling) ve konveks görüntü oluşturma işlevlerini yerine getirmekte olup ikili görüntüde yer alan fazlalık, boşluk ve pürüzleri iyileştirmektedir. Daha sonra, iyileştirilmiş bina bölgelerinin köşe noktaları belirlenmiştir. Bu işlem binaların dikdörtgen şeklinde olduğu varsayımı altında yapılmış olup, her bina için, dört köşe noktası tespit edilmiştir. Tespit edilen köşe noktaları belirli bir sıra ile birleştirilerek bina sınırları çıkarılmıştır. Yaklaşımın bu bölümünde orijinal görüntüde yer alan çalışma alanı sekiz farklı site alanına bölünerek işlemler her bir site alanı için ayrı ayrı uygulanmıştır. Örnek bir site alanı için tespit edilen orijinal bina bölgeleri, morfolojik işlemler sonrasında iyileştirilmiş bina bölgeleri ve çıkarılan bina sınırları (yeşil) Şekil 3’te gösterilmektedir.



Şekil 3. Örnek bir site alanı için (a) orijinal bina bölgeleri, (b) iyileştirilmiş bina bölgeleri (c) bina sınırları

### 3. BİNA CEPHE DOKUSU ÇIKARIMI

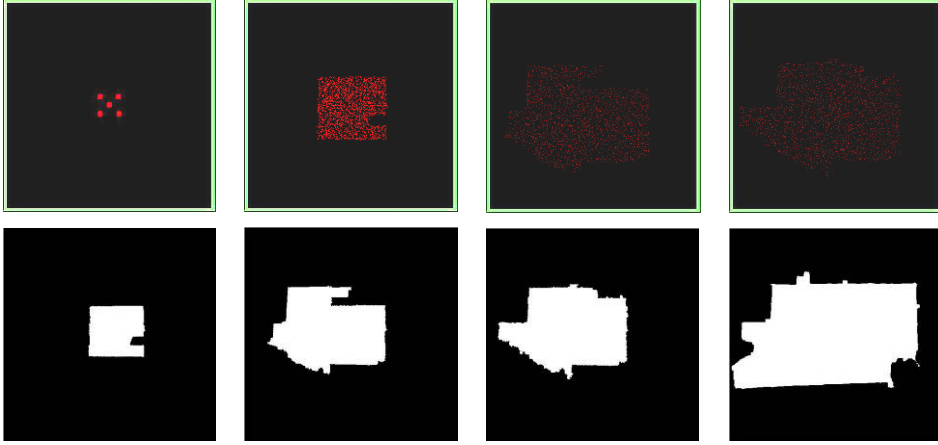
Geliştirilen yaklaşımın ikinci adımında yerden çekilmiş bina fotoğraflarından bina cephe dokularının otomatik çıkarımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen yaklaşımın işlem adımları Şekil 4’te görülmektedir.



Şekil 4. Bina cephe dokusu çıkarımı için geliştirilen yaklaşımın işlem adımları

Yerden çekilen bina fotoğrafları 480 x 480’lik kare formata dönüştürüldükten sonra ilk işlem adımı olan “Bina Cephe Dokusu Bölütlemesi” ne girdi olarak verilir. Bu fotoğraflardan ön plan (bina cephe

dokusu) ve arka plan (gökyüzü, komşu binalar, vs) ayırımının yapılabilmesi için Watershed bölütleme algoritması kullanılmıştır. Algoritmanın ilk adımı olarak görüntünün gradyan bilgisi elde edilir. Bir sonraki adım, işaretçi piksellerin belirlenmesidir. Görüntü bölütleme işleminin başlatılması bu piksellere bağlı olup aynı zamanda bölütlemenin ne kadar başarılı olacağı da bu piksellerin sayısı ve konumuna göre değişmektedir. Bu çalışmada, başlangıçta atanan işaretçi piksellerin sayısı ve görüntü üzerindeki konumları standart bir şablona göre belirlenmektedir. İteratif bölütleme işlemi tatmin edici düzeyde bir doku bilgisi oluşturulana kadar tekrar ettirilir. Buna göre, her bir iterasyon için bölütleme işlemini gerçekleştirecek olan işaretçi pikseller, yeni üretilen bölgelerin içerisine gelişigüzel bir biçimde atanarak daha fazla cephe dokusunun üretilmesine olanak sağlar. Şekil 5’te örnek bir bina için dört iterasyon sonucunda çıkarılan cephe dokusu görülmektedir.



**Şekil 5.** Soldan sağa doğru iterasyon sayısı artarken; işaretçi pikseller (üst satır) ve üretilen cephe bölgeleri (alt satır)

Bina cephe dokusu bölütlemesinin ardından elde edilen görüntünün otomatik rektifikasyonu gerçekleştirilir. Rektifikasyon işleminin ilk adımında, bölütleme sonucunda elde edilen ikili görüntünün kenar bilgisi Canny algoritması ile çıkarılır. Daha sonra, tespit edilen kenarlardan dikey ve güçlü olanları Hough dönüşümü ile bulunur. Dikey kenarlar rektifikasyon işleminde gerekli olan cephe köşe noktalarının tespiti için daha önemli olduklarından yatay kenarların bilinmesine gerek yoktur. Elde edilen dikey Hough kenarlarının uç noktaları belirlenerek cephe köşe noktaları tespit edilir. Dikey kenarların (sağ ve sol kenar için) tek birer doğru parçasından oluşma zorunluluğu olmadığından cephe köşe noktaları da dörtten fazla sayıda olabilir. Bu nedenle bu sayının dörde indirgenmesi için görüntünün köşe noktalarına en yakın dört cephe köşe noktası seçilir. Seçilen bu köşe noktalarından  $(X_1, Y_1)$ ,  $(X_2, Y_2)$ ,  $(X_3, Y_3)$ ,  $(X_4, Y_4)$ , bu noktaların ilişkilendirileceği yeni noktalar  $(X'_1, Y'_1)$ ,  $(X'_2, Y'_2)$ ,  $(X'_3, Y'_3)$ ,  $(X'_4, Y'_4)$  belirlenir. Bunun için orijinal köşe noktaları yatay ve dikey doğrultuda birbirlerine göre hizalanır. Elde edilen iki nokta kümesinden bir dönüşüm matrisi oluşturularak bu matris orijinal görüntü ile çarpılır ve ‘Kübik Konvolüsyon’ yöntemi ile yeniden örnekleme işlemi gerçekleştirilir. Örnek bir bina için yapılan rektifikasyon işleminin sonucu Şekil 6’da görülmektedir.



**Şekil 6.** Rektifikasyon işleminden önceki (sol) ve sonraki (sağ) bina cephe dokuları

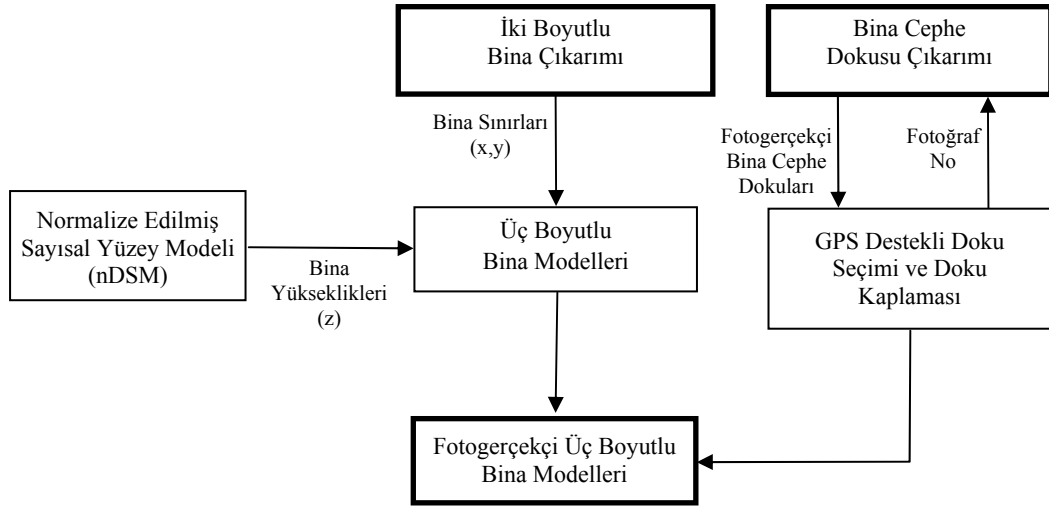
Bina cephe dokusu çıkarımı işleminin son adımında cephe dokusunu kısmen bloke eden engellerin giderilmesine yönelik bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmanın ilk adımında, tek bir cephe görüntüsü üzerindeki engellerin bulunduğu bölgenin tespiti yapılır. Daha sonra, tespit edilen bölge içerisindeki engel ve cephe pikselleri bir eşik değeri ile ayrıştırılır. Ardından, bölge içerisindeki cephe pikselleri görüntünün geri kalan kısmında araştırılarak en yüksek korelasyona sahip engel içermeyen aday bölgenin seçimi yapılır. Seçilmiş olan bu aday bölge engel içeren bölgenin üzerine yapıştırılarak cephe dokusu daha gerçekçi hale getirilir. Yapıştırma işlemi sonucunda bağlantı yerlerinde oluşan izler, hareket-izi yöntemi kullanılarak yok edilir. Ayrıca, yapıştırılan parçanın komşu pikseller ile olan ışık farklılıkları da geliştirilen bir algoritma ile azaltılır. Bu işlemler görüntü üzerinde tatmin edici bir doku oluşana kadar tekrar edilebilmektedir. Örnek bir bina için engel giderme yöntemi sonuçları Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Engel giderme işleminden önceki (sol) ve sonraki (sağ) bina cephe dokuları

#### 4. FOTOGERÇEKÇİ 3-B MODELLEME

Önerilen yapının son yaklaşımında 3-b bina modellerinin üretilmesi, doku seçimi ve doku kaplaması adımlarından oluşan fotogerçekçi 3-b modelleme işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 8).

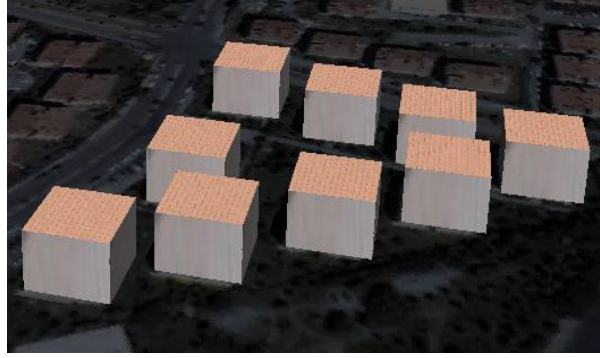


Şekil 8. Fotogerçekçi 3-b bina modellemesi için geliştirilen yaklaşımın işlem adımları

Buna göre, önce 3-b katı bina modelleri yaratılmaktadır. Bunun için gerekli olan girdilerden ilki yukarıda elde edilmiş olan bina sınırlarıdır. Bu sınırlar modelin (x,y) bileşenini oluşturmaktadır. Diğer girdi ise bina yüksekliklerinin yer aldığı (z) bileşenidir. Bu bileşen, Koc San ve Türker, (2006) tarafından daha önce gerçekleştirilen bir çalışmada üretilmiş olan normalize edilmiş sayısal yüzey modeli kullanılarak elde edilmiştir. Bu model, temel olarak, sayısal yüzey modelinden (DSM) sayısal arazi modelinin (DTM) çıkarılması ve sonrasında uygun bir eşik değerinin uygulanmasıyla elde edilmiş olup belli bir yüksekliğin üzerindeki binaların yaklaşık olarak konumlarını veren bir harita olarak düşünülebilir. Bu haritanın mevcut bina sınırları üzerine bindirilmesi sonucunda her binaya ait yükseklik bilgisi elde edilmektedir. Binaların üç boyutlu konum bilgilerine ek olarak daha önceden hesaplanmış olan yönelim ve kayma bilgileri de kullanılarak üç boyutlu katı bina modelleri mevcut

uydu görüntüsü üzerine bindirilerek üretilmiştir. Örnek bir site alanı için oluşturulan modeller Şekil 9’da gösterilmektedir.

Oluşturulan modellerin daha gerçekçi bir hale dönüştürülebilmesi için fotogerçekçi dokularla kaplanması büyük bir önem arz etmektedir. Bu nedenle, üretilen dokuların ilgili bina cephelerine kaplanabilmesi için bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmanın ilk adımında, her bir site alanı için mevcut cephe fotoğraflarından en uygun iki tanesinin seçimi yapılmaktadır. Bu noktada iki önemli varsayım yapılmıştır. Bunlardan ilki dikdörtgensel bir binanın karşılıklı cephelerinin aynı dokuya sahip olması durumudur. Diğeri ise bir site alanında yer alan tüm binaların cephe dokularının özdeş olduğu varsayımdır. Bu durumda iki adet fotoğraf ile bir site alanında yer alan tüm binaların doku bilgisi elde edilmiş olacaktır. En uygun fotoğrafın seçimi yapılırken fotoğraf çekim noktasının el GPS’i ile ölçülen konum ve yön bilgilerinden faydalanılmaktadır. Seçilen fotoğrafların numaraları “Bina Cephe Dokusu Çıkarımı” bileşenine girdi olarak gönderilmektedir. Algoritmanın ikinci adımında ise seçilen bina cephe fotoğrafları bu bileşende yer alan işlemlerden geçirilerek fotogerçekçi bina cephe dokuları haline getirilmektedir. Son adımda ise bu dokular 3-b modeller üzerinde kaplanmaktadır. Çalışma alanında yer alan sekiz adet site için doku kaplı 3-b modeller Şekil 10’de verilmiştir. Modelde yer alan bina çatıları manuel olarak üretilmiş olup “otomatik 3-b bina modellemesi” kapsamı dışında tutulmuştur.



Şekil 9. Örnek bir site alanı için üretilen 3-b katı bina modelleri

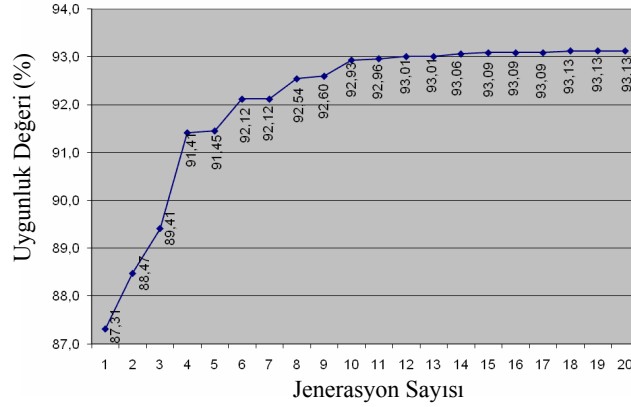


Şekil 10. Çalışma alanındaki sekiz adet site için doku kaplı 3-b modeller

## 5. UYGULAMA SONUÇLARI

Önerilen yapı, Ankara ili, Batıkent yerleşim bölgesinden seçilen sekiz farklı site alanında yer alan toplam 110 dikdörtgen bina üzerinde uygulanmıştır. Batıkent, Ankara'nın batısında 1000 hektarlık bir alan üzerinde kurulmuş Türkiye'nin en büyük yerleşim projelerinden biridir. Bu bağlamda, planlı ve düzenli bir gelişmeye sahip olmasıyla birlikte, konut, endüstriyel, ticari, sosyal ve kültürel kullanıma özgü farklı türde binaları barındırmaktadır. Binaların geometrik şekilleri de kullanıma paralel olarak çeşitlilik arz etmektedir.

Önerilen yapının her bir yaklaşımı farklı doğruluk analizi yöntemleri kullanılarak test edilmiştir. Bunlardan ilki bina bölge çıkarımı doğruluğunun ölçülmesidir. Bunun için genetik algoritma içerisinde yer alan uygunluk değeri kullanılmıştır. Yirmi jenerasyon için yapılan on farklı testin ortalaması alındığında %93'lük bir uygunluk değeri elde edilmiştir. Bu ortalamaların yirmi jenerasyon için değişimini gösteren performans eğrisi Şekil 11'de görülmektedir.



Şekil 11. Bina bölge çıkarımı için performans eğrisi

Bina sınırlarının çıkarılmasına yönelik yapılan doğruluk analizinde konumsal doğruluğun ölçüldüğü kantitatif bir metrik kullanılmıştır. Bunun için, öncelikle bina köşe noktaları elle belirlenerek bir referans veri oluşturulmuştur. Bu referans veri ile bulunan bina sınırlarının köşe noktaları arasındaki uzaklığa bakılarak hata ölçümü yapılmıştır.

$$UZAKLIK = \sqrt{(X_R - X_P)^2 + (Y_R - Y_P)^2} \quad (1)$$

Yukarıdaki formüle göre  $X_R$  ve  $Y_R$  referans veriye ait değerler iken  $X_P$  ve  $Y_P$  ise geliştirilen yaklaşım tarafından bulunan köşe noktalarının piksel değerleridir. Hesaplanan hata değerinin anlam kazanabilmesi için belirli bir güven aralığının belirlenmesi şarttır. Dolayısıyla, normal dağılım modeli seçilerek %95 güven aralığında doğruluk değerleri aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

$$\text{Doğruluk} = Z\_Değeri * SS\_UZAKLIK + Ort\_UZAKLIK \quad (2)$$

Buna göre,  $Z\_Değeri$  normal dağılım için %95 güven aralığındaki tablo değeri olup  $SS\_UZAKLIK$  ve  $Ort\_UZAKLIK$  ise seçilen köşe noktalarına ait uzaklıkların standart sapma ve ortalama değerlerini göstermektedir. Çalışma alanında yer alan sekiz sitedeki 110 binanın sınırlarının çıkarılma doğrulukları %95'lik güven aralığında Tablo 1'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, her bir site için belirlenen güven aralığındaki ortalama hatalar sırasıyla; 2,76, 3,82, 3,18, 4,28, 5,48, 4,10, 4,72 ve 2,91 m olarak hesaplanmış olup genel hata ise yaklaşık 3,9 m olarak bulunmuştur.

Bina cephe dokusu çıkarımında yer alan adımlardan her biri farklı doğruluk analizi yöntemleri kullanılarak test edilmiştir. Bunlardan ilki olan bina cephe dokusu bölütlemesinde kantitatif bir yöntem kullanılmıştır. Buna göre, önce manuel olarak cephe bölütleri çıkarılarak bir referans veri



kümesi oluşturulmuştur. Sonra, önerilen yaklaşım tarafından çıkarılan bölütler ile referans veri karşılaştırılarak çeşitli değerler hesaplanmıştır. Bu değerler; doğru-pozitif (dp), yanlış-pozitif (yp) ve yanlış-negatif (yn) olup bu değerlerden kalite yüzdesi (KY) aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

$$KY = \frac{100 * dp}{dp + yp + yn} \quad (3)$$

Doğru-pozitif (dp) hem referans verisinin hem de bulunan “bina cephesi (ön plan)” olarak belirlenen piksellerdir. Öte yandan “yp”, bina cephesi olarak bulunup referans veri tarafından “arka plan” olarak belirlenmiş piksellerdir. “yn” değeri ise “yp”nin tam tersini ifade etmektedir. On beş adet yersel bina cephe fotoğrafından oluşan veri setinin doğruluk analizi sonuçları Tablo 2’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ortalama kalite yüzdesi %82.3 olarak bulunmuştur. Buna ek olarak, 1 ve 4 numaralı binaların diğerlerine göre düşük kalite yüzdesine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni ilgili binaların yüksek miktarda yanlış-negatif piksel içermesidir.

**Tablo 1.** Bina sınırları çıkarımı için sekiz site alanında yer alan 110 binaya ait doğruluk tabloları

Site No	Bina No	Doğruluk (metre)	Site No	Bina No	Doğruluk (metre)	Site No	Bina No	Doğruluk (metre)	Site No	Bina No	Doğruluk (metre)
1	1	2,22	3	1	4,33	5	1	3,32	8	1	2,59
	2	1,00		2	3,13		2	4,11		2	1,41
	3	2,45		3	1,60		3	7,89		3	2,59
	4	2,59		4	3,13		4	2,94		4	1,60
	5	2,79		5	3,69		5	2,99		5	3,69
	6	3,78		6	4,38		6	5,66		6	2,59
	7	3,94		7	2,90		7	9,58		7	1,45
	8	2,69		8	1,84		8	3,71		8	2,99
	9	2,37		9	3,58		9	2,37		9	3,95
	10	2,37	10	5,71	10		11,31	10		2,99	
	11	2,82	11	3,27	11		6,42	11		2,79	
	12	2,61	12	11,27	12	3,58	12	1,84			
	13	3,37	13	3,95	13	4,28	13	4,75			
	14	3,67	14	2,99	14	4,23	14	1,60			
2	1	4,65	4	15	2,61	6	4	4,31		15	4,51
	2	3,94		16	5,44		1	2,59		16	4,21
	3	2,13		17	1,60		2	3,40		17	3,69
	4	3,86		18	1,60		3	5,93		18	4,21
	5	3,57		19	4,38		4	6,84		19	2,79
	6	2,74		20	3,27		5	3,24		20	2,90
	7	5,48		21	5,84		6	6,18		21	1,84
	8	6,14		22	5,53		7	5,19		22	1,84
	9	2,45		23	4,33		8	5,55		23	2,59
	10	3,53		24	2,99		9	2,37		24	1,84
	11	3,56		25	5,53		10	3,91		25	2,61
		26		2,79	11		7,77	26		2,99	
		27		3,95	12		4,73	27		2,99	
		28		6,80	13	3,62	28	6,80			
		29		2,79			29	2,79			
		30		1,84			30	1,84			

**Tablo 2.** Bina cephe dokularının bölütlemesine ilişkin doğruluk analizi sonuçları

Bina No	Ky (%)	Bina No	Ky (%)	Bina No	Ky (%)	Bina No	Ky (%)	Bina No	Ky (%)
1	53,4	4	67,5	7	86,0	10	86,4	13	86,7
2	82,5	5	79,9	8	85,2	11	74,7	14	81,2
3	78,1	6	97,8	9	87,2	12	93,7	15	93,7

Bina cephe dokusunun rektifikasyon doğruluğunun hesaplanmasında bina sınırlarının çıkarımında kullanılan doğruluk analizi yönteminin aynısı kullanılmıştır. Ancak bu sefer bina sınırlarının köşe noktaları yerine cephe görüntüsü üzerinde belirlenen çeşitli noktaların referans veride belirlenmiş noktalara olan uzaklıkları hesaplanmıştır. Bölütleme sonrasında elde edilen cephe görüntülerinin %95'lik güven aralığındaki rektifikasyon doğrulukları Tablo 3'te verilmiştir. Buna göre belirlenen güven aralığındaki ortalama hata yaklaşık 12 piksel (~ 1 m) olarak hesaplanmıştır. Ayrıca; 3, 6, 7, 9, 11 ve 12 numaralı binaların hata oranlarının diğerlerine göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun, dikey cephe kenarlarının çıkarılması sırasında yaşanan problemlerden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

**Tablo 3.** Bina cephe dokularının rektifikasyonuna ilişkin doğruluk analizi sonuçları

Bina No	Doğruluk (Piksel)	Bina No	Doğruluk (Piksel)	Bina No	Doğruluk (Piksel)	Bina No	Doğruluk (Piksel)	Bina No	Doğruluk (Piksel)
1	4,9	4	8,1	7	26,9	10	6,9	13	9,6
2	4,4	5	9,0	8	9,0	11	13,6	14	7,0
3	22,2	6	15,7	9	17,6	12	15,9	15	8,4

Son olarak, engellerden arındırılmış görüntülerin doğruluk düzeylerinin ölçülebilmesi için kalitatif bir metrik kullanılmıştır. Bu metriğe göre, çıktı görüntüleri 1 (yüksek kalite) – 6 (düşük kalite) arasında bir ölçek kullanılarak çeşitli gözlemcilerce değerlendirilmiştir. Değerlendirmeyi yapan gözlemciler görüntü işleme ve uzaktan algılama alanlarında çalışan öğrenci, araştırma görevlileri ve öğretim üyeleri arasından seçilmiştir. Engellerden arındırılmış 15 adet yersel bina cephe görüntüsünün kalitatif doğruluk analizi sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Buna göre, veri kümesinde yer alan görüntülerin kriter puanları 1.7 ile 3.9 arasında değişmekte iken ortalama puan 2.58 olarak bulunmuştur. Elde edilen başarısız sonuçların temel nedenlerinin giderilemeyen engeller, nesnelere arasındaki ani geçişlerden kaynaklanan süreksizlikler ve hareket-izi kaynaklı görüntü üzerindeki lokal bozulmalar olduğu sonucuna varılmıştır.

**Tablo 4.** Bina cephe dokularını kapatan engellerin giderilmesine ilişkin doğruluk analizi sonuçları

Bina No	Ortalama Kriter Puanı	Bina No	Ortalama Kriter Puanı	Bina No	Ortalama Kriter Puanı	Bina No	Ortalama Kriter Puanı	Bina No	Ortalama Kriter Puanı
1	3,4	4	3,0	7	2,2	10	2,6	13	3,9
2	2,9	5	2,3	8	3,4	11	2,4	14	1,7
3	2,3	6	2,2	9	2,0	12	2,0	15	2,4

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 3-b bina modellerinin otomatik olarak oluşturulmasına yönelik üç aşamalı bir yapı geliştirilmiştir. İlk aşamada 1-m çözünürlüklü keskinleştirilmiş uydu görüntülerinden bina bölgeleri ve sınırları otomatik olarak tespit edilmektedir. İkinci aşamada, bina cephelerine ait dokular yersel fotoğraflardan otomatik bir yaklaşımla çıkarılmaktadır. Bunun için sırasıyla doku bölütlemesi, doku rektifikasyonu ve engel giderme adımları izlenmektedir. Son aşamada, 3-b model üretimi, doku seçimi ve doku kaplaması işlemleri yerine getirilmektedir. Önerilen yapı, Ankara ili, Batıkent yerleşim bölgesinden seçilmiş sekiz farklı site alanındaki toplam 110 dikdörtgen bina üzerinde uygulanmış olup tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçların doğrulukları kantitatif ve kalitatif yöntemlerle test edilmiştir. Buna göre, bina bölgelerinin çıkarımında %93'lük bir uygunluk değeri elde edilirken bina sınırları 4 m hata ile tespit edilmiştir. Önerilen yaklaşım ile geleneksel sınıflandırma tekniklerine göre daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, ilk jenerasyonun ortalama değeri, bir başka deyişle Fisher doğrusal sınıflayıcısının elde ettiği değer, %87 olarak bulunurken son jenerasyonda bu değer %93 seviyesine yükseldiği gözlemlenmektedir. Bina cephe dokularının çıkarılma başarısı ise %80 - %85 aralığında bulunmuştur. Burada kullanılan iteratif yöntem sayesinde geleneksel watershed bölütleme algoritmasına göre daha fazla bina cephe dokusunun çıkarılması sağlanmıştır. Sonrasında,

elde edilen dokuların rektifikasyonu %95’lik güven aralığında yaklaşık 1 m hata ile gerçekleştirilmiştir. Bu adım tamamen otomatik olarak gerçekleştirilerek görüntüdeki perspektif bozulmalar daha hızlı ve doğru bir biçimde düzeltilmektedir. Son olarak, cephe dokularını kapatan engellerin giderilmesi için yapılan kalitatif test sonucunda ortalama 2.58’lik bir kriter puanı elde edilmiştir. Bu aşamada kullanılan korelasyon tabanlı görüntü eşleme yöntemi ile mümkün olan en uygun görüntü bölgesinin seçilebildiği görülmüştür. Sonuç olarak bu çalışma ile fotogerçekçi 3-b modellerin başarılı bir şekilde üretilmesi ve sanal şehirlerin otomatik olarak yaratılması yolunda önemli bir adım atılmıştır.

#### KAYNAKLAR

- Ahmadi, S., Valadan Zoej, M.J., Ebadi, H., Moghaddam, H.A., Mohammedzadeh, A.,** 2010, Automatic urban boundary extraction from high resolution aerial images using an innovative model of active contours, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12, 150-157.
- Böhm, J.,** 2008, Façade Detail from Incomplete Range Data, *Proceedings of ISPRS 2008*, 3-11 July, Beijing, China.
- Carlberg, M., Andrews, J., Gao, P., Zakhor, A.,** 2008, Fast Surface Reconstruction and Segmentation with Ground-Based and Airborne LIDAR Range Data, *Proceedings of 4th International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission (3DPVT'08)*, 18-20 June, Atlanta, Georgia, Usa.
- Cho, W., Jwa, Y.S., Chang, H.J., Lee, S.H.,** 2004, Pseudo-Grid Based Building Extraction using Airborne LIDAR Data, *Proceedings of ISPRS 2004*, 12-23 July, Istanbul, Turkey.
- Frueh, C., Zakhor, A.,** 2003, Constructing 3-D City Models by Merging Aerial and Ground Views, *IEEE Transactions on Computer Graphics and Applications*, 23(6), 52-61.
- Hoegner, L., Stilla, U.,** 2009, Thermal Leakage Detection on Building Facades Using Infrared Textures Generated by Mobile Mapping, *Proceedings of 2009 Urban Remote Sensing Joint Event*, 20-22 May, Shanghai, China.
- Karantzalos, K., Paragios, N.,** 2010, Large Scale Building Reconstruction Through Information Fusion and 3-D Priors, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(5), 2283-2296.
- Kim, Z., Nevatia, R.,** 2004, Automatic Description of Complex Buildings from Multiple Images, *Computer Vision and Image Understanding*, 96, 60-95.
- Koc San, D., Turker, M.,** 2006, Automatic Building Detection and Delineation from High Resolution Space Images Using Model Based Approach, *Proceedings of the ISPRS Workshop on Topographic Mapping from Space (with Special Emphasis on Small Satellites)*, February 14-16, Ankara, Turkey.
- Laycock, R.G., Ryder, G.D.G., Day, A.M.,** 2007, Automatic Generation, Texturing and Population of a Reflective Real-Time Urban Environment, *Computers and Graphics*, 31, 625-635.
- Lee, D.H., Lee, K.M., Lee, S.U.,** 2008, Fusion of Lidar and Imagery for Reliable Building Extraction, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 74(2), 215-225.
- Lu, Y.H., Trinder, J.C., Kubik, K.,** 2006, Automatic Building Detection Using the Dempster-Shafer Algorithm, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72, 395-403.
- Peng, J., Liu, Y.C.,** 2005, Model and Context-driven Building Extraction in Dense Urban Aerial Images, *International Journal of Remote Sensing*, 26, 1289-1307.
- Perkins, S., Theiler, J., Brumby, S.P., Harvey, N.R., Porter, R., Szymanski, J.J., Bloch, J.J.,** 2000, GENIE: A Hybrid Genetic Algorithm for Feature Classification in Multi-Spectral Images, *SPIE Proceedings*, 4120, 52-62.
- Poullis, C., You, S.,** 2009, Photorealistic Large-Scale Urban City Model Reconstruction, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 15(4), 654-669.
- Pu, S., Vosselman, G.,** 2009, Knowledge-based Reconstruction of Building Models from Terrestrial Laser Scanning Data, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(6), 575-584.
- Rottensteiner, F.,** 2003, Automatic Generation of High-Quality Building Models from Lidar Data, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 23(6), 42-50.
- Sohn, G., Dowman, I.,** 2007, Data Fusion of High-resolution Satellite Imagery and LIDAR Data for Automatic Building Extraction, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62(1), 43-63.
- Tian, Y., Gerke, M., Vosselman, G., Zhu, Q.,** 2010, Knowledge-based Building Reconstruction from Terrestrial Video Sequences, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(4), 395-408.
- Vu, T.T., Yamazaki, F., Matsuoka, M.,** 2009, Multi-scale Solution for Building Extraction from Lidar and Image Data, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 11, 281-289.
- Wang, O., Lodha, S.K., Helmbold, D.P.,** 2006, A Bayesian Approach to Building Footprint Extraction from Aerial LIDAR Data, *Proceedings of 3rd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission (3DPVT'06)*, 14-16 June, NC, Usa, pp.192-199.
- Zhang, K., Yan, J., Chen, S.C.,** 2006, Automatic Construction of Building Footprints from Airborne LIDAR Data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(9), 2523-2533.