

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### DİJİTAL YÜKSEKLİK MODELİ VERİSİ KULLANILARAK ÜÇ BOYUTLU DİJİTAL HARİTA MODELİ GELİŞTİRİLMESİ

Emin Emrah ÖZSAVAŞ

Ankara Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Refik SAMET

Üçgenleştirilmiş yüzeylerin gerçek-zamanlı işlenmesi ve çok çözünürlüklü modellenmesi son zamanlarda oldukça ilgi çeken bir konu olmuştur. Geniş ölçekli dijital yükseklik modellerinin interaktif olarak görüntülenmesinde verimlilik en önemli etkenlerden biri olmaktadır. Grafikselleştirme yükü, detay seviyesi tekniklerinin kullanımı ile azaltılmalıdır. Bu çalışmada üçgenleştirme teknikleri incelenmiştir. Dijital yükseklik modellerinin yüksek seviyedeki düzenliliğine bağlı olarak, dörtlü ağaç temelli hiyerarşik arazi üçgenleştirme modelleri, tüm metotlar arasında en etkili olanlardır. Sınırlandırılmış dörtlü ağaç temelli üçgenleştirme metoduna dayanan bir algoritma temel alınarak üç yeni hata hesaplama tekniği ve farklı iki yaklaşım önerilmiştir. İlk yaklaşımda modellenecek arazinin kümelere ayrılması, ikinci yaklaşımda ise kullanılacak çözünürlük parametrelerinin dinamikleştirilmesi önerilmektedir. Yapılan uygulamalar sonucunda, her iki yaklaşımla da orijinal algoritmadan daha az sayıda üçgenle daha yüksek model doğruluğu elde edilmiştir.

**2007, 58 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Üçgenleştirme, ikili ağaç, dörtlü ağaç, detay seviyesi, dijital yükseklik modeli, üçgenleştirilmiş düzensiz ağ modeli

## ABSTRACT

MS Thesis

### IMPLEMENTING 3D DIGITAL MAP MODELING USING DIGITAL ELEVATION MODEL DATA

Emin Emrah ÖZSAVAŞ

Ankara University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Computer Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Refik SAMET

Real-time rendering and multiresolution modeling of triangulated surfaces has attracted growing interest over the last decade. For interactive visualization of very large scale grid digital elevation models efficiency is a particularly important aspect. The graphics rendering load must be controlled by reducing the number of rendered primitives using level-of-detail (LOD) techniques. In this project, the triangulation techniques were examined. Due to the high regularity of grid digital elevation models, hierarchical quadtree based terrain triangulation models have been shown to be among the most efficient methods available. An algorithm based on restricted quadtree triangulation method was implemented, three new error metric calculation techniques and two new approaches were proposed. In the first approach, dividing the terrain to clusters and in the second approach, using dynamic resolution parameters were proposed. The results of the implementations show that, the two proposed approach give greater terrain accuracy values with decreasing number of triangles than the original algorithm.

**2007, 58 pages**

**Key Words:** Triangulation, binary tree, quadtree, level-of-detail, digital elevation model, triangulated irregular network model

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarımı yönlendiren, araőtırmalarımın her aşamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyerek akademik ortamda olduğu kadar beőeri iliőkilerde de engin fikirleriyle yetiőme ve geliőmeme katkıda bulunan danışman hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Refik SAMET'e, çalıőmalarım süresince manevi desteklerini esirgemeyen değerli bölüm baőkanımız sayın Prof. Dr. Baki KOYUNCU'ya teőekkürü borç bilirim.

Emin Emrah ÖZSAVAŞ

Ankara, Temmuz 2007

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	Vii
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	13
2.1 Gerçek Zamanlı Arazi İşleme Algoritması.....	13
2.2 Dörtlü Ağaç (Quadtree) Temelli Üçgenleştirme Metotları .....	15
2.2.1 Sınırlandırılmış dörtlü ağaçlar .....	15
2.2.2 Aşağıdan yukarıya üçgenleştirme.....	16
2.2.3 Yukarıdan aşağıya üçgenleştirme.....	17
2.3 Üç Boyutlu Modelin Doğruluğunun Hesaplanması .....	20
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	22
3.1 Önerilen Hata Hesaplama Teknikleri .....	22
3.1.1 Önerilen birinci hata hesaplama tekniği (teknik 2) .....	22
3.1.2 Önerilen ikinci hata hesaplama tekniği (teknik 3).....	23
3.1.3 Önerilen üçüncü hata hesaplama tekniği (teknik 4).....	24
3.2 Birinci Yaklaşım.....	24
3.2.1 Birinci adım (1. ve 2. bloklar) .....	26
3.2.2 İkinci adım (3. ve 4. bloklar) .....	26
3.2.3 Üçüncü adım (5. ve 6. bloklar).....	26
3.2.4 Dördüncü adım (7. blok) .....	27
3.3 İkinci Yaklaşım .....	27
3.3.1 Birinci adım (1. ve 2. bloklar) .....	29
3.3.2 İkinci adım (3., 4. ve 5. bloklar) .....	29
3.3.3 Üçüncü adım (6. blok).....	29
3.3.4 Çözünürlük parametrelerinin hesaplanması.....	30
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	32
4.1 Birinci Yaklaşım Ait Bulgular .....	32
4.1.1 Uygulama 1: teknik 1 .....	32
4.1.2 Uygulama 2: yaklaşımın ilk veri dosyasına uygulanması.....	33

<b>4.1.3 Uygulama 3: yaklaşımın ikinci veri dosyasına uygulanması .....</b>	<b>36</b>
<b>4.2 İkinci Yaklaşım Ait Bulgular .....</b>	<b>38</b>
<b>4.2.1 Uygulama 1: sabit çözünürlük parametreleri .....</b>	<b>39</b>
<b>4.2.2 Uygulama 2: dinamik çözünürlük parametreleri .....</b>	<b>41</b>
<b>5. SONUÇ.....</b>	<b>53</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>56</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Dijital Yükseklik Modeli üzerindeki noktalar .....	2
Şekil 1.2 Üçgenleştirilmiş Düzensiz Ağ Modeli üzerindeki noktalar.....	2
Şekil 2.1 Yükseklik bilgilerinin ikili ağaç yapısı olarak gösterilmesi (Hesse and.....	14
Gavrilova. 2003) .....	14
Şekil 2.2 Bölme (split) ve birleştirme (merge) işlemleri (Hesse and Gavrilova 2003)...	14
Şekil 2.3 Üç boyutlu görüntü üzerinde kırılmalar.....	15
Şekil 2.4 Sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış dörtlü ağaç yapıları .....	16
Şekil 2.5 Aşağıdan yukarıya üçgenleştirme metodu için başlangıç kümesi .....	16
Şekil 2.6 Aşağıdan yukarıya üçgenleştirme metodu .....	17
Şekil 2.7 Bir düğüm için uzaklık ve kenar uzunluğu parametreleri.....	18
Şekil 2.8 $dh_i$ değerleri.....	19
Şekil 2.9 Kenar ve orta noktası .....	19
Şekil 2.10 Yukarıdan aşağıya üçgenleştirme metodunun üç seviye ilerlemesi .....	20
Şekil 3.1 Dörtlü ağaç düğümüne ait dokuz nokta .....	23
Şekil 3.2 Birinci yaklaşıma ait blok diyagram.....	25
Şekil 3.3 İkinci yaklaşıma ait blok diyagram.....	28
Şekil 4.1 test1.raw dosyasına teknik 1' in uygulanması ile elde edilen üç boyutlu model.....	33
Şekil 4.2 test2.raw dosyasına teknik 1' in uygulanması ile elde edilen üç boyutlu model.....	33
Şekil 4.3 test1.raw dosyasına ait üç boyutlu modelin doğruluk ve üçgen sayısı değerleri.....	35
Şekil 4.4 test1.raw dosyasıyla Uygulama 2' nin sonucunda elde edilen üç boyutlu model.....	35
Şekil 4.5 test2.raw dosyasına ait üç boyutlu modelin doğruluk ve üçgen sayısı değerleri.....	37
Şekil 4.6 test2.raw dosyasıyla Uygulama 2' nin sonucunda elde edilen üç boyutlu model.....	38
Şekil 4.7 test1.raw dosyası için teknik 1' in sonuçları.....	43
Şekil 4.8 test1.raw dosyası için teknik 2' nin sonuçları.....	44
Şekil 4.9 test1.raw dosyası için teknik 3' ün sonuçları .....	45

Şekil 4.10 test1.raw dosyası için teknik 4' ün sonuçları .....	46
Şekil 4.11 test2.raw dosyası için teknik 1' in sonuçları .....	47
Şekil 4.12 test2.raw dosyası için teknik 2' nin sonuçları .....	48
Şekil 4.13 test2.raw dosyası için teknik 3' ün sonuçları .....	49
Şekil 4.14 test2.raw dosyası için teknik 4' ün sonuçları .....	50
Şekil 4.15 test1.raw dosyasından 8 yükseklik aralığı ile teknik 3' ün kullanımıyla elde edilen üç boyutlu model .....	51
Şekil 4.16 test2.raw dosyasından 8 yükseklik aralığı ile teknik 3' ün kullanımıyla elde edilen üç boyutlu model .....	52

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Dosya özellikleri ve parametre değerleri .....	31
Çizelge 4.1 teknik 1' e ait sonuçlar.....	32
Çizelge 4.2 test1.raw dosyasına ait dört kümenin özellikleri.....	34
Çizelge 4.3 Birinci yaklaşımın test1.raw dosyasına ait sonuçları.....	34
Çizelge 4.4 test2.raw dosyasına ait dört kümenin özellikleri.....	36
Çizelge 4.5 Birinci yaklaşımın test2.raw dosyasına ait sonuçları.....	37
Çizelge 4.6 Birinci uygulamaya ait sonuçlar .....	40
Çizelge 4.7 Yükseklik aralıkları ve c değerleri.....	41
Çizelge 4.8 İkinci uygulamaya ait sonuçlar .....	42



## 1. GİRİŞ

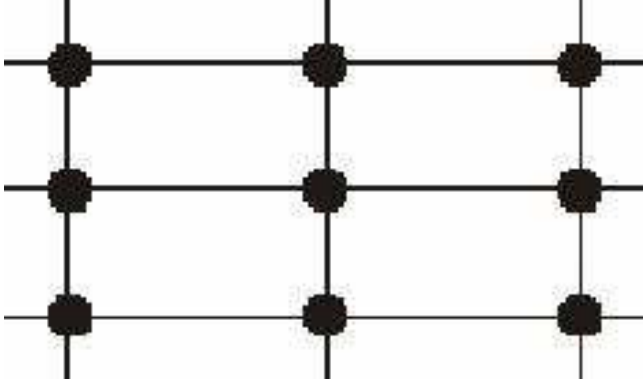
Dünya yüzeyindeki bir arazinin modellenmesi, eski çağlardan günümüze dek insanların ilgisini çekmiştir. MÖ 4000'li yıllara ait olan iki boyutlu çizimler, en eski modeller olarak da bilinmektedir. Günümüzde ise, bilgisayarlar ve Coğrafi Bilgi Sistemleri, üç boyutlu arazi modellenmesini kolaylaştırmaktadırlar. Bir arazinin üç boyutlu modelini elde etme sürecinin adımları aşağıda belirtilen şekildedir:

- \*Arazi yüzeyinde yer alan noktaların yükseklik değerlerinin elde edilmesi,
- \*Üçgenleştirme ve poligonlaştırma teknikleri ile arazinin ağ yapısının oluşturulması,
- \*Ağ yapısının üç boyutlu olarak görüntülenmesi,
- \*Üç boyutlu görüntü üzerinde nesne tanıma gibi bazı özel uygulamaların gerçekleştirilmesi.

Üç boyutlu arazi modellemede temel bilgi, yükseklik verisidir. Yükseklik verisi, iki boyutlu haritaların dijitalleştirilmesinden farklı çözünürlükte uydu fotoğraflarının kullanılmasına uzanan farklı metotlarla elde edilebilir. İki tip yükseklik verisi standartlaşmıştır:

- \*Dijital Yükseklik Modeli (DEM-Digital Elevation Model)
- \*Üçgenleştirilmiş Düzensiz Ağ Modeli (TIN-Triangulated Irregular Network)

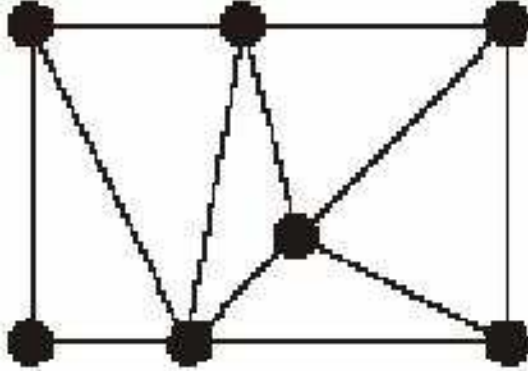
Dijital Yükseklik Modeli, düzgün aralıklarla sıralanmış noktaların bilgisini içerir. Noktalar kuzeyden güneye ve batıdan doğuya sıralanmıştır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 Dijital Yükseklik Modeli üzerindeki noktalar

Dijital Yükseklik Modeli temelli algoritmaların en yaygın dezavantajı, poligonlaştırma işleminin optimal olamamasıdır. Geniş ve düz araziler, küçük ve engebeli araziler kadar poligon yoğunluğu gerektirebilmektedir.

Üçgenleştirilmiş Düzensiz Ağ Modelinde ise, noktalar dağınıktır ve rasgele seçilmiştir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2 Üçgenleştirilmiş Düzensiz Ağ Modeli üzerindeki noktalar

Üçgenleştirilmiş Düzensiz Ağ Modelinde veri miktarı, Dijital Yükseklik Modeline göre az olmasına rağmen, ağ yapısının oluşturulması ve basitleştirilmesi, noktaların düzensizliğinden ötürü daha kompleks ve yoğun matematiksel işlemleri gerektirmektedir. Buna bağlı olarak da modelin oluşma zamanı büyümektedir.

Tezin amacı, mevcut üç boyutlu dijital harita modelleme yöntemlerinin araştırılması, bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajlarının belirlenmesi, dezavantajların giderilebilirliğinin incelenmesi ve giderebilmek için yeni tekniklerin geliştirilmesi, coğrafi bir alanın yükseklik bilgilerini giriş verisi olarak alıp alanın üç boyutlu modelini mevcut yöntemleri ve geliştirilmiş teknikleri kullanarak yaratarak sonuçları analiz etmektir.

Konuyla ilgili kaynaklar ve özetleri aşağıda belirtilmiştir:

Yang *et al.* (2005), makalelerinde, çok çözünürlüklü dijital arazi modelleme işleminde kullanılmak üzere TIN ve grid yapılarını entegre eden bir yaklaşımı anlatmıştır. Çok çözünürlüklü arazi modelleri, özellikle Coğrafi Bilgi Sistemleri için arazi görüntülemeye, üç boyutlu görüntülemenin hızını artırma açısından çok etkili yaklaşımlardır. Makalede, var olan algoritma ve tekniklere ek olarak yeni bir arazi modelleme tekniği sunulmaktadır. Bu teknik, çok çözünürlüklü arazileri, iki ana metot yardımıyla görüntülemektedir: TIN ve grid. Yapılan uygulamaların sonuçları, yeni tekniğin zaman ve önemli özelliklerin kaybolmaması açısından etkili olduğunu göstermektedir.

İnagaki *et al.* (2001), makalelerinde, üç boyutlu modellerin hatalarını noktaların bölümü ile gerçekleştiren bir yaklaşımı anlatmıştır. Üç boyutlu modeller genellikle boyut olarak büyük olmakta ve üzerinde işlem yapılması çok zaman almaktadır. Bu sorunun çözülmesi, modelin görüntüsünde çok az etkisi olan üçgenlerin çıkartılarak verinin azaltılmasıyla çözülmektedir. Üç boyutlu modeller arasındaki farkların hesaplanabilmesi, örneklenecek nokta bulunmaması nedeniyle çok zor gerçekleşmektedir. Bu makalede, üç boyutlu modeller arasındaki hataları hesaplayan ölçüm şeması sunulmuştur. Hata, üç boyutlu modelleri iki boyutlu yüzeylere, iki boyutlu yüzeyleri de noktalara ayırarak hesaplanmaktadır. Bu şekilde, sadece geometrik hatalar değil, aynı zamanda renk farklılıkları da tespit edilebilmektedir.

Hilbert ve Brunnett (2004), makalelerinde, geometri ve görüntü temelli detay seviyesi mekanizmalarını birleştirdikleri sistemi anlatmıştır. Bu sistemde, görüntü içerisinde yer alan nesnenin poligonal ağ yapısı ile temsil edildiği varsayılmıştır. Yapılan ön işleme, her nesnenin sürekli çok çözünürlüklü modeli yaratılmaktadır. Çalışma esnasında öncelikle, her nesne için, önceki çerçeveler için üretilmiş tahminlerden uygun olan olup olmadığı kontrol edilmektedir. Eğer yoksa, uygun yeni tahminler üretilmektedir. Daha sonra, bu geometri tabanlı tahmin, eğer mantıklı ve etkili ise görüntü tabanlı tahminle yer değiştirmektedir. Nesnelerin seçilmiş tahminleri, sonraki çerçevelerin işlenmesi için kullanılmaktadır.

Xu *et al.* (2004), makalelerinde, doğrudan ağ isimli yeni bir çok çözünürlüklü üçgenel ağ veri yapısını sunmaktadır. Genellikle, çok çözünürlüklü üçgenel ağ yapılarında ebeveyn düğümler ve bu düğümlerin daha düşük çözünürlükte olduğu ata düğümleri bulunmaktadır. Veri tabanından gerekli veriyi alma işlemi, kökten yaprak düğümlere kadar ağaç yapısının üzerinden geçmektir. Bu işlem, çok fazla veri olması nedeniyle verimli değildir. Bu problemi çözebilmek için, geçmişte, çok çeşitli uzamsal indeksler tanımlanmıştır fakat; seviye seviye ağaç yapısının üzerinden geçme önemini ve kullanım sıklığını yitirmemiştir. Doğrudan ağ yapısı ile, veri tabanından bilgi çekme işlemi azalmaktadır. Eski indeksleme metotları ile kıyaslandığında, gerçek araziler için performans artışı gözlemlenmektedir.

Pajarola and DeCoro (2004), makalelerinde, interaktif detay seviyesi ve geniş üçgenel ağların işlenmesi için etkili bir çok çözünürlüklü ağ çatısı sunmaktadır. Bu yaklaşım, görsel yapaylıkları minimize eden gerçek-zamanlı bir ağ basitleştirmesini sağlamaktadır. Bu makale, yarım kenar üçgenel ağına dayanan çok çözünürlüklü hiyerarşik bir üçgenleştirme çatısı sunmaktadır. Bu çatı, boyut ve zaman olarak oldukça etkilidir. Hata hesaplamalarını ve dinamik ağ güncelleştirmelerini yapabilmek için ihtiyacı olan zaman, tüm işlemin zamanının çok küçük bir parçasıdır.

Wang and Tang (2000), makalelerinde, üç boyutlu arazi ağ modelini organize etmek ve arazi versini sınırlandırılmış dörtlü ağaç üçgenleştirme metoduyla bakış-bağımlı sürekli

detay seviyesinde işlemeyi gerçekleştirmek için hiyerarşik bir ağaç yapısı önermektedir. Algoritma iki bölüme ayrılabilir: ön işleme ve işleme. Ön işleme bölümünde uyarlamalı hiyerarşik yapı oluşturulmaktadır. Daha sonrasında sınırlandırılmış dörtlü ağaç üçgenleştirilmesi uygulanmaktadır. Uygulama sonuçları, algoritmanın, interaktif dinamik arazi modelleme için basit ve etkili olduğunu göstermektedir.

Leal *et al.* (2006), makalelerinde, bilinmeyen, yapısı olmayan ortamların çok çözünürlüklü üç boyutlu modelleri için yeni bir yaklaşımı anlatmıştır. Algoritma, bilgi edinme sürecinde belirsizliklerin belirlenmesini içeren olasılıksal bir çerçeveye dayanmaktadır. Bu makalenin temel katkısı, bilginin olasılıksal temsilidir. Önerilen yaklaşım, modelleme işleminin yapı ve bilgi edinimi adımlarındaki belirsizliklerin özeti için, bir temsil şeklini tanıtmaktadır. Böylelikle, yüzeydeki belirsizliklerin miktar bilgisizliğinde kararlar verilebilmektedir. Algoritma bunun yanında farklı türlerdeki sensörlerden ve farklı bakış açılarından elde edilen verinin birleşmesini mümkün kılmaktadır.

Hesse and Gavrilova (2003), makalelerinde, geniş ölçekli arazilerin gerçek-zamanlı olarak görüntülenmesi için Gerçek Zamanlı Arazi İşleme Algoritması temelli bir algoritmayı açıklamıştır. Algoritmanın karmaşıklığı makul bir seviyede kalırken, üç boyutlu interaktif çevre içerisinde, arazi verisi görüntüsünün kalitesi ve pürüzsüzlüğü de korunmaktadır. Makalenin temel katkısı, örtük koordinatlar metodu ve dinamik detay seviyesigüncellemesi için bakış açısına bağımlı üçgen işleme metodu gibi bir takım etkili teknikleri tanıtmıştır.

Carmichael *et al.* (2000), makalelerinde, yüzey eşleme algoritmaları için yerel üç boyutlu imza temelli gelişimleri rapor etmiştir. Bu algoritmanın üç boyutlu model veri tabanlarından nesne tanınması ve genel yüzeylerin bakış tescilinde etkili olduğu önceden gösterilmiştir. Makalede temel eşleme algoritmasına yapılan ekler açıklanmıştır. Öncelikle; sayısal verimliliğin önemli olduğu geniş veri kümeleri ve çözünürlük olarak çok fazla çeşitlilik gösteren veri kümeleri ile çalışılmasına olanak

sağlayan gelişimler açıklanmıştır. Sonrasında, görüntüde çok fazla parazitlenmenin olduğu durumlarda üç boyutlu nesne tanıma imkanı veren gelişimler anlatılmıştır.

Huber and Hebert (1999), makalelerinde, yapısal olmayan arazilerin, birkaç metreden yüzlerce metreye kadar olan bir yelpazede çalışan sensörlerin kullanılmasıyla, yüksek çözünürlüklü üç boyutlu modellenmesi problemini tartışmıştır. Kullanılan modalite; çok geniş çapta değişken çözünürlük, tam olarak tanınabilen özelliklerin yokluğu ve geniş veri kümelerini içermektedir. Makalede, fotoğraf dizilerini entegre eden ve kaydeden bir harita oluşturma algoritması önerilmektedir. Algoritmanın yeterliliği, çok geniş arazilerin modellenmesiyle ispatlanmıştır.

Johnson *et al.* (1999), makalelerinde, birden fazla nesnenin eş zamanlı tanınması için şekil temelli bir nesne tanıma algoritmasını açıklamıştır. Nesne tanıma işlemi, yerel yüzey imzaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Radoiu and Roman (2000), makalelerinde, dağıtık veri kullanan bilimsel bir görüntüleme tekniğini açıklamıştır. Rasgele belirlenmiş iki boyutlu noktalar içerisinde yükseklikleri bilinen noktaların kullanılmasıyla üç boyutlu haritaya geçiş gösterilmiştir. Uygulamanın amacı; bazı düzensiz dağılmış noktalardaki yüksekliği temsil eden iki boyutlu veriyi, üç boyutlu interaktif haritalara dönüştürmektir. Çıkış veri ve dosyalarının yapısı İnternet dağıtımına olanak sağlamalıdır. Temel konu, kullanılan algoritmaların hızı ve doğruluğudur. Düzensiz dağılmış veriyi içeren bir dosya, veri kümesini temsil etmektedir: yatay düzlemdeki noktaların koordinatları ve karşılık gelen yükseklikleri.

Gimel'farb and Haralick (1999), makalelerinde, farklı kameralardan, farklı zamanlarda çekilen fotoğraflar kullanılarak bir arazinin dijital yükseklik modelinin oluşturulmasını anlatmıştır. İlk adımda arazinin yükseklik modeli ve orthoimage elde edilmiştir. Diğer yaklaşımlardan farklı olarak, oklüzyon ve farklı gölge yerleşimleri de dikkate alınmıştır. Sonraki adımda yükseklik modeli basitleştirilmiştir. Makalenin amacı, gelişigüzel seçilmiş bir arazinin, özellikleri hakkında önceden elde edilmiş bir bilgi olmaksızın,

Dijital Yükseklik Modeline dönüşümü hakkında yapılacak hesaplamaları değerlendirmektedir. Üçgenleştirilmiş yüzeylerin gerçek-zamanlı ve çok çözünürlüklü olarak modellenmesi, geçtiğimiz yıllarda çok önem arz eden bir alan olmuştur. Geniş ölçekli Dijital Yükseklik Modellerinin inaktif olarak modellenmesinde verimlilik çok önemli bir konudur. Detay seviyesi tekniklerinin kullanımıyla işlenen poligonların sayısı azaltılarak grafik yükü kontrol edilmelidir. Dijital Yükseklik Modellerinin yüksek oranda düzenliliği nedeniyle, dörtlü ağaç temelli arazi üçgenleştirme teknikleri, mevcut teknikler içerisinde en etkili olanlarıdır. Makalede, dörtlü ağaç temelli yüzey ayrıştırma ve üçgenleştirme teknikleri açıklanmakta ve karşılaştırılmaktadır.

Pajarola (2002), makalesinde, dörtlü ağaç temelli arazi modelleme tekniklerini tartışmış ve karşılaştırmıştır. Dijital yükseklik modeli, giriş verisi olarak alınmış ve devam eden detay seviyesi amaçlanmıştır. Arazi işleme karmaşıklığını görselliği etkilemeden azaltmak için, arazi üçgenleştirme işlemi arazi yüzeyleriyle uyumlu olmalıdır: arazi üzerindeki engebesiz alanlarda büyük ve az sayıda üçgen, engebenin çok olduğu alanlarda küçük ve çok sayıda üçgen bulunmalıdır. Çalışma esnasında çok sayıda farklı detay seviyesi desteklenmelidir.

Pajarola (1999), makalesinde, adapte olabilen üçgenleştirme ve dinamik görüş yönetimini entegre eden bir görüntüleme sistemini açıklamıştır. Üçgenleştirme tekniği sınırlandırılmış dörtlü ağaç üçgenleştirme temellidir.

Szenberg *et al.* (1999), makalelerinde, nesne ve arazi için iki ayrı algoritmanın kombinasyonunun kullanıldığı bir görüntüleme tekniğini açıklamıştır. Makalenin amacı; araç, ev ve yol gibi nesnelere içeren arazi uydu fotoğraflarını işlemek ve böylelikle uçuş simülasyonuna olanak sağlayan modeller oluşturmaktır. Bu tip algoritmalarda, performans, interaktif navigasyonu mümkün kılması nedeniyle önemlidir. Aşılması gereken bir engel, arazinin geometrik detaylarının yüksek oranda hafıza gerektirmesidir. Bu çalışmada, araziden bağımsız olarak, poligonlar ve çizgiler şeklinde temsil edilen vektör nesnelere barındıran görüntülerin olduğu durumlar incelenmiştir. Bu nesnelere,

kişisel bilgisayarlar gibi iş istasyonlarında mevcut olan OpenGL ve benzeri standart grafik işleme sistemleri ile kolaylıkla ve etkin bir şekilde görüntülenebilmektedir.

Kersting and Döllner (2002), makalelerinde, vektör verinin, üç boyutlu nesnelere eklenmesini sağlayan yeni bir tekniği anlatmıştır. Teknik, görsel eşleştirmenin kullanıcı ihtiyaçlarına adapte olabilmesine ve kullanıcıların vektör veriyi model üzerinde interaktif olarak değiştirebilmelerine olanak tanımaktadır. Vektör veri, coğrafi Bilgi Sistemleri tarafından işlenen veri çeşitleri arasında ana kategorilerden biridir. Makalede açıklanan teknik, Coğrafi Bilgi Sistemleri arayüz teknolojisi için temel bir mekazımayı tanımlamaktadır ve keşif araçları ile görsel analiz gelişimine olanak sağlamaktadır.

Shiode (2001), makalesinde, şehirsellemedeki yenilikleri anlatmış, üç boyutlu modellemede kullanılan veri ve teknikleri tanımlamıştır. Günümüzde; kentlerin ve binaların üç boyutlu modellenmesine ilgi giderek artmaktadır ve bu konularla ilgili birçok teknik ve algoritma geliştirilmektedir. Bu makalede, bu alanda karşılaşılan bazı durumlar açıklanmaktadır.

Frueh and Zakhor (2001), makalelerinde, şehirselle alanların üç boyutlu modellemesini açıklamıştır. Bu teknikle, alanın üç boyutlu modeli birkaç dakika içinde elde edilebilmektedir. Üç boyutlu şehir modellerinin oluşturulması halen zor ve zaman alan bir işlem olarak karşımıza çıkmaktadır. Ticari modeller kullanılarak yapılan işlemler aylarca sürebilmekte ve genellikle kullanıcıların sürece müdahalesini gerektirmektedir. Yerleşim birimlerinin üç boyutlu modellenmesi için çeşitli yaklaşımlar karşımıza çıkmaktadır. Bunlardan biri de havadan ve uzaydan elde edilen görüntülerin kullanıldığı uzaktan algılamadır. Makalede; yerleşim biriminin tamamının üç boyutlu modelini, iki boyutlu azer tarayıcılar ve dijital kameraların kullanımıyla elde edebilen bir metot açıklanmaktadır.

Pajarola *et al.* (2002), makalelerinde, Üçgenleştirilmiş Dağınık Ağ temelli ağ yapısı basitleştirme işlemi ile dörtlü ağaç temelli üçgenleştirme tekniğinin kombinasyonunu açıklamıştır. Bu yaklaşım, rasgele noktaların oluşturduğu bir veri kümesinde etkin



üçgenleştirmeyi sağlamaktadır. Dijital Yükseklik Modeli arazi veri kümelerinin düzenli ağ yapısı özelliğinden faydalanılması suretiyle, dörtlü ağaç temelli hiyerarşik ve çok çözünürlüklü üçgenleştirme metotlarının; detay seviyesi seçimi, üçgenleştirme ve işleme konularındaki verimliliği ispatlanmış bir gerçek olmuştur. Diğer taraftan Üçgenleştirilmiş Düzensiz Ağ modeli ise, belirli sayıda üçgen ve belirli detay seviyesi eşik hata değerine ulaşmada oldukça etkilidir. Makalede, oldukça zor olan, düzensiz veri kümesi üzerinde dörtlü ağaç temelli üçgenleştirme işlemi açıklanmıştır.

Frueh *et al.* (2004), makalelerinde, lazer tarayıcılardan elde edilen gökyüzü ve yüzey fotoğraflarının kullanımıyla üç boyutlu şehir görüntüsünün oluşturulmasını açıklamıştır. Öncelikle resimler kaydedilmiş ve model üzerindeki her üçgen için optimal resim seçilmiştir. Yerleşim birimlerinin üç boyutlu modellenmesi, çok çeşitli uygulama alanlarında yer bulmaktadır. Bu modeller genellikle üç boyutlu dijital yüzey modelleri ve üç boyutlu ağ yapıları olarak gösterilmektedir. Şehir planlamacılığı, sanal haritacılık ve bilgisayar oyunları gibi uygulamalarda, sadece geometri değil görsellik de önem kazanmaktadır. Makalede, modellere, gerçeğe yakın seviyede görsellik kazandırılmaya çalışılmıştır.

van Kaick *et al.* (2004), makalelerinde, üçgenleştirilmiş ağ yapısından üçgen şeritlerinin elde edilmesini anlatmıştır. Etkin üçgen şeridi üretilmesine olanak tanıyan bir veri yapısı da açıklanmıştır. Birçok bilimsel uygulamada, çok büyük ölçekli verinin saklanması ve işlenmesi için metotların aranması büyük önem teşkil etmektedir. Sıkıştırma ve veri indirgemesi yapılmaksızın, veri kümelerinin gerçek-zamanlı olarak görüntülenmesi ve analiz edilmesi imkansızdır. Esnek oldukları ve modelleme paketlerinin çoğu tarafından desteklendikleri için; poligonal yüzeyler geometrik modellerin temsilinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bir poligonal yüzey, genellikle, üçgenler kümesinden oluşmaktadır. Makalede, üçgen şeritlerinin kullanımıyla veri indirgemesi gerçekleştirilmesi açıklanmıştır.

Larsen and Christensen (2003), makalelerinde, kompleks poligonal yüzeyleri görüntüleyebilen gerçek-zamanlı bir detay indirgeme tekniğini açıklamıştır. Bu metot,

son kullanıcı grafik kartları için optimize edilmiştir. Günümüzde çoğu modelin gerektirdiği üçgen sayısı, grafik kartlarının gerçek-zamanlı çalışma kapasitesini aşmaktadır. Gelecekte, grafik kartlarının saniyede işleyebileceği üçgen sayısı ve arazi karmaşıklığının artması beklenmektedir; fakat, diğer taraftan uygulamaların getireceği gereksinimler ve karmaşıklıklar da artacaktır.

Falby *et al.* (1998), makalelerinde, NPSNET sistemini ve bu sistemdeki dörtlü ağaç yapısının uygulanmasını, arazi sayfalama ve arazi işleme tekniklerini açıklamıştır.

Lindstrom *et al.* (1996), makalelerinde, gerçek-zamanlı detay indirgeme ve kompleks poligonal yüzeylerin görüntülenmesini açıklamıştır. Algoritma, sıkıştırılmış ve düzgün ağ yapısını kullanmaktadır. Önerilen algoritma şu özelliklere sahiptir: İşlenecek poligon sayısında yüksek oranda indirgeme, değişik detay seviyeleri arasında yumuşak ve sürekli geçişler, detay seviyelerinin gerçek-zamanlı olarak dinamik bir şekilde üretilmesi, kullanıcı tarafından tanımlanmış görüntü kalitesi ölçütüne olan destek.

Tzovaras and Strintzis (2001), makalelerinde, üç boyutlu yüzeylerin hiyerarşik adapte olabilen üçgenleştirme ile temsilini ve kodlanmasını açıklamıştır. Prosedür, QMVINT tekniği kullanılarak elde edilen piramitsel analizlere dayanmaktadır. Çalışmada; ağ yapısının basitleştirilmesi, ağ bilgisinin etkili bir şekilde sıkıştırılması, ağ bilgisinin aşamalı olarak iletimi, ağ bilgisinin öncelikli olarak iletimi, takip eden ölçekler arasında tam bir doğruluk, istenilen alanın üçgenleştirilmesi ve matematiksel verimlilik bir üçgenleştirme algoritmasında bulunması gereken özellikler olarak belirtilmiştir.

Okuda *et al.* (2004), makalelerinde, farklı üç boyutlu ağlardaki benzerlikleri tanımayı açıklamıştır. Önerilen metot üç adımdan oluşmaktadır. Üç boyutlu ağlar öncelikle, aynı ana eksene sahip olacak şekilde PCA ile hizalanırlar. Her döndürülmüş yüzey, deforme edilmiş bir silindir yardımıyla değerlendirilir. Sonrasında korelasyonları hesaplanarak mesafeleri karşılaştırılır. Bu adımlar hiyerarşik olarak gerçekleştirilir. Uygulama sonuçları, önerilen metodun benzerlikleri kolaylıkla ve tam olarak bulabildiğini göstermektedir.

Sim *et al.* (2002), makalelerinde, üç boyutlu üçgensel ağlar için, bağlantısallık ve geometri verisinden oluşan bir sıkıştırma algoritması önermektedir. Öncelikle, bağlantısallık verisini kayıp olmaksızın sıkıştırabilmek için nokta derecesi eğrilmesi metodu uygulanmaktadır. Çoğu geleneksel algoritmada bağlantısallık ve geometri verisi, birbirinden bağımsız olarak kodlanırken; önerilen yaklaşımda geometri verisi, bağlantısallık verisini etkili bir şekilde sıkıştırabilmek için tamamıyla kullanılmaktadır. İkinci olarak, çift paralel tahmin tekniği, etkili bir geometri tahmin planı olarak uygulanmaktadır. Önerilen algoritma, üçgensel yapıyı benimseyerek, geleneksel algoritmalarından daha düşük tahmin hatası sağlamaktadır. Uygulama sonuçları, önerilen algoritmanın birçok üç boyutlu ağ için geleneksel algoritmalarından daha fazla sıkıştırma sağladığını göstermektedir.

Khan *et al.* (2004), makalelerinde, bir pikap ve üç boyutlu tarayıcıdan oluşan basit bir düzencekle, gerçek nesnelerin üç boyutlu modellerini üreten bir sistemin prototipini tanıtmıştır. Gerçek nesnelerin üç boyutlu yüzey modelleri, çok sayıda farklı bakış açılarından görüntünün entegrasyonu ile elde edilmektedir. Genelde bu tip modeller için üretilen ağlar düzensiz bağlantısallığa sahiptir. Düzensiz ağ modellerini, düzenli ağlara yaklaştırmak amaçlı, çok sayıda ağ oluşturma tekniği önerilmiştir. Nesnenin yüzeyinin farklı bölümlerini gösteren çok sayıda tarama, iki boyutlu düzelleme eşlenir. Üç boyutlu yüzey modeli, iki boyutlu resim gibi gösterilerek mevcut ve yeni sinyal ve görüntü işleme tekniklerinin kolaylıkla uygulanması sağlanır.

Hussain *et al.* (2003), makalelerinde, bir poligonal modelin detay seviyelerini üreten, kenar çökmesi işlemi temeline dayanan yeni bir otomatik metodu anlatmıştır. Bir kenar çökmesi algoritmasında, kenar çökmesi dönüşümlerinin sonucu olan hatanın ölçüm yolu, bu tip dönüşümleri düzenlemede çok önemli bir rol oynamaktadır. Hatanın yerel hesaplaması ve değerlendirilmesi temelli, geliştirilmesi kolay, kısa süreli çalışma zamanına sahip olan, geometrik özellikleri otomatik olarak muhafaza edebilen yeni bir geometrik sapma ölçüsü açıklanmıştır. Uygulama sonuçları, algoritmanın ürettiği farklı detay seviyelerindeki modellerin aslına uygun olduğunu göstermektedir.

Tseng *et al.* (2001), makalelerinde, geniş ölçekli arazi modelleme için dinamik yükleme tekniğiyle birleştirilmiş, bakış-bağımlı çok çözünürlüklü modelleme metodunu anlatmıştır. Çok çözünürlüklü modelleme ile, bir arazi modeli çok çözünürlüklü bir yapı olarak oluşturulur ve gerçek-zamanlı görüntülemeyi başarabilmek için uygun bir yapı seçilir. Görüntüleme performansını arttırabilmek bakış- bağımlı çerçeve kullanılmaktadır. Dinamik yüklemeyle, geniş ölçekli arazi bloklara bölünür ve gerekli bloklar dinamik olarak yüklenir.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

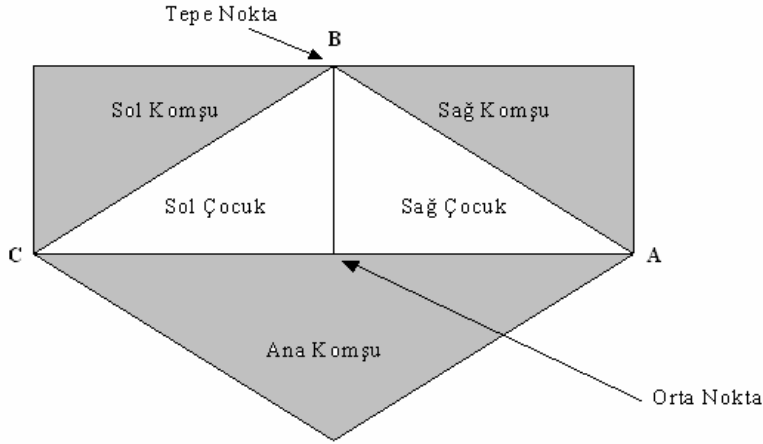
Üçgenleştirilmiş Düzensiz Ağ Modelindeki yoğun ve kompleks matematiksel işlemlerden dolayı bu model, arazinin üç boyutlu modelini gerçek-zamanlı olarak oluşturmak için uygun değildir.

Dijital Yükseklik Modelini kullanan algoritmalar, tanımlanmış bir geometrik hatayı aşmadan, uygulamalara özel kritik yüzey özelliklerini muhafaza ederek belirli sayıda nokta içeren üç boyutlu modeller oluşturmaktadır. Modellenecek arazi aynı zamanda yükseklik haritası olarak da adlandırılmaktadır. Yükseklik haritaları genellikle NxM boyutlu gri-skala görüntüler olarak saklanır. Görüntüdeki her pikselin renk değeri, arazi üzerinde karşılık gelen noktanın yüksekliğini (0-255) göstermektedir. Yükseklik haritaları otomatik olarak üretilebildiği gibi, gerçek bir araziye ait Dijital Yükseklik Modeli dosyaları da olabilir.

Yapılan çalışmalar, Dijital Yükseklik Modelini kullanan algoritmalar içerisinde Dörtlü Ağaç (quadtree) Temelli Üçgenleştirme metotlarının hız açısından en iyi seviyede olduğunu göstermektedir.

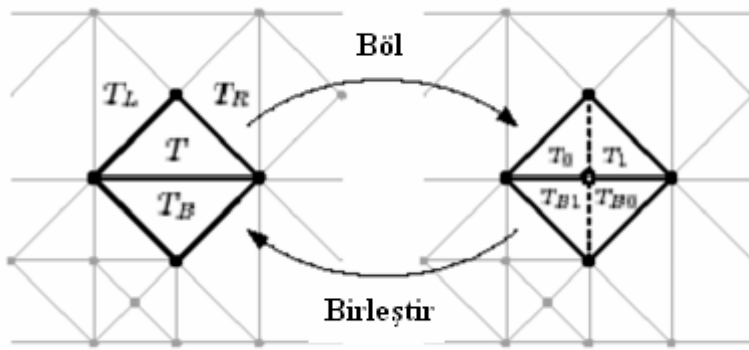
### 2.1 Gerçek Zamanlı Arazi İşleme Algoritması

Dijital Yükseklik Modeli kullanılarak kontrol edilen detay seviyesinde ağ yapısı oluşturmak için kullanılan algoritmalarından biri, gerçek zamanlı arazi işleme algoritmasıdır. Bu algoritma ağ yapısının detayının kontrolüne izin vermekte, kaliteyi artırırken işlem boyunca oluşturulan üçgen sayısını azaltmaktadır. Algoritma içerisinde iki ana işlem olan bölme ve birleştirme işlemleri ile detay seviyesi dinamik olarak düzenlenebilmektedir. Kullanılan yükseklik verisi ikili ağaç yapısı olarak saklanmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Yükseklik bilgilerinin ikili ağaç yapısı olarak gösterilmesi (Hesse and Gavrilova. 2003)

Bölme işlemi yeni bir nokta eklerken, birleştirme işlemi ile varolan bir nokta iptal edilmektedir (Şekil 2.2). Bölme işlemi ile toplam nokta sayısı, buna bağlı olarak oluşturulacak ağ yapısı üzerindeki toplam poligon sayısı ve detay da artmaktadır.



Şekil 2.2 Bölme (split) ve birleştirme (merge) işlemleri (Hesse and Gavrilova 2003)

## 2.2 Dörtlü Ağaç (quadtree) Temelli Üçgenleştirme Metotları

Dörtlü ağaç temelli üçgenleştirme metotlarının temel yaklaşımı aşağıda belirtilen adımlardan oluşmaktadır:

\*Başlangıç örnekleme,

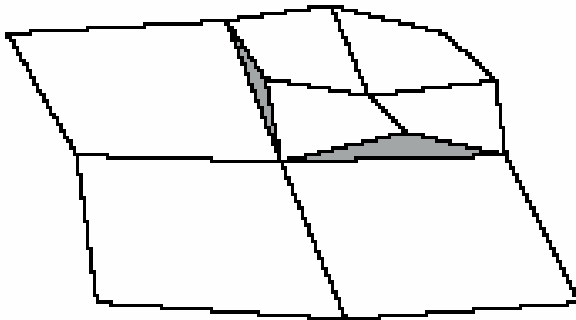
\*Başlangıç kümesi üzerinde hata değerlerine göre her bölgenin değerlendirilmesi,

\*Hata değeri kabul edilebilir bölgelerin dörde bölünmesi. 2 ve 3. adımların hata değerleri kabul edilebilir bölgeler için rekürsif olarak tekrarlanması,

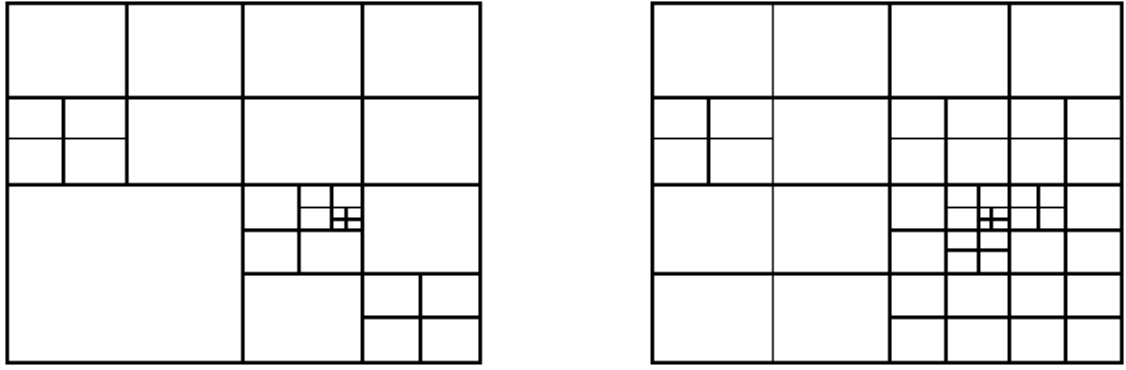
\*Oluşan her dörtlü ağaç bölgesi için poligonlaştırma işleminin gerçekleştirilmesi.

### 2.2.1 Sınırlandırılmış dörtlü ağaçlar

Bölme işlemleri sonucunda kırılmaların oluşmasını engelleyebilmek için komşu dörtlü ağaçların boyutunun kontrolü gerekmektedir. Bir dörtlü ağaçla komşuları arasındaki detay seviyesi farkının birden fazla olduğu durumlarda görüntüde kırılmalar oluşmaktadır (Şekil 2.3). Seviye farkının en fazla bir olmasının sağlanmasıyla kırılmalar önlenmektedir. Bu kontrolün olduğu yapılar sınırlandırılmış, olmadığı yapılar ise sınırlandırılmamış dörtlü ağaçlardır (Şekil 2.4).



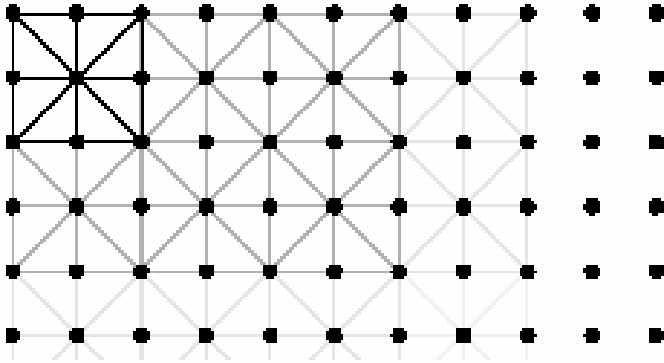
Şekil 2.3 Üç boyutlu görüntü üzerinde kırılmalar



Şekil 2.4 Sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış dörtlü ağaç yapıları

### 2.2.2 Aşağıdan yukarıya üçgenleştirme

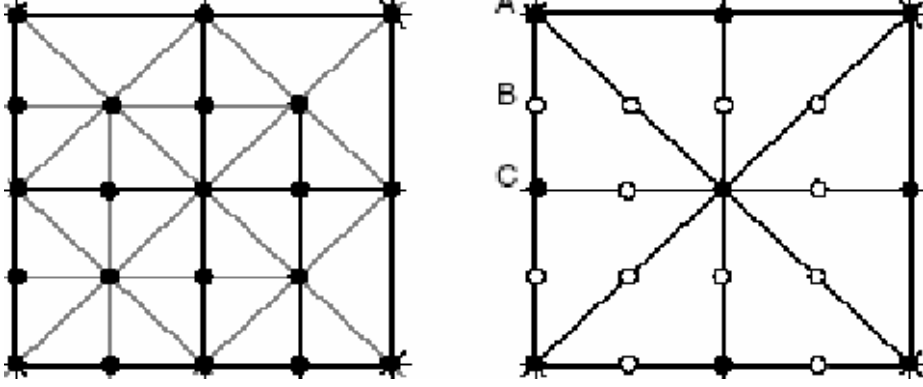
Aşağıdan yukarıya sınırlandırılmış dörtlü ağaç yapısında başlangıç kümesi 3\*3 lük düğümlere ayrılır (Şekil 2.5). Bu düğümler yaprak düğümler olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2.5 Aşağıdan yukarıya üçgenleştirme metodu için başlangıç kümesi

Birleştirilebilen tüm düğümler, sınırlandırma şartına bağlı kalarak en alt seviyeden en üst seviyeye doğru birleştirilir (Şekil 2.6). Birleştirme işlemi, hata değeri belirlenen aralıkta olan noktaların iptali ile gerçekleşmektedir.





Şekil 2.6 Aşağıdan yukarıya üçgenleştirme metodu

### 2.2.3 Yukarıdan aşağıya üçgenleştirme

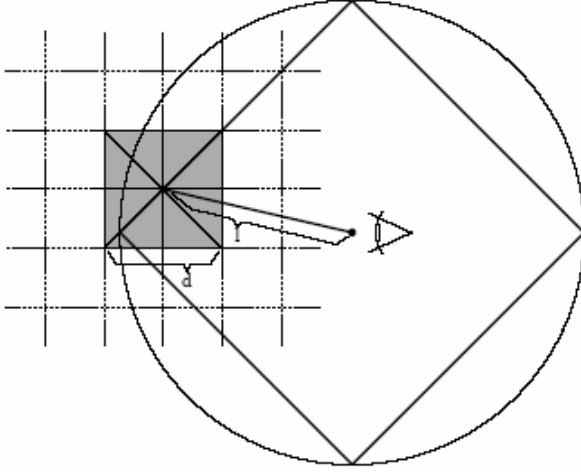
Veri kümesinin tamamı tek bir kök düğümü olarak temsil edilir. Sınırlandırma şartı dahilinde dörde bölme işlemi alt seviyelere doğru devam ettirilir. Bölme işlemi, hata değerleri uygun olan noktaların yapıya eklenmesiyle gerçekleştirilmektedir. Hiçbir zaman birleştirme işlemi yapılmamaktadır (Şekil 2.7).

Bölme kriteri belirlenirken aşağıda belirtilen hususlar dikkate alınmaktadır:

Kamera veya bakan kişinin araziye olan uzaklığı arttıkça çözünürlük azalmalıdır. Bu şart,

$$(l/d) < C \quad (1)$$

koşulu ile sağlanmaktadır. Burada  $l$ , ele alınan düğümün merkezinin kamera veya bakan kişiye olan uzaklığını,  $d$  ise düğümün kenar uzunluğunu göstermektedir (Şekil 3.1).  $C$  konfigüre edilebilen sabittir. Görüntünün kalitesini belirler.



Şekil 2.7 Bir düğüm için uzaklık ve kenar uzunluğu parametreleri

$C$  sabiti, minimum global çözünürlük olarak da adlandırılmaktadır.  $C$  değeri büyüdükçe görüntünün çözünürlüğü de artmaktadır.

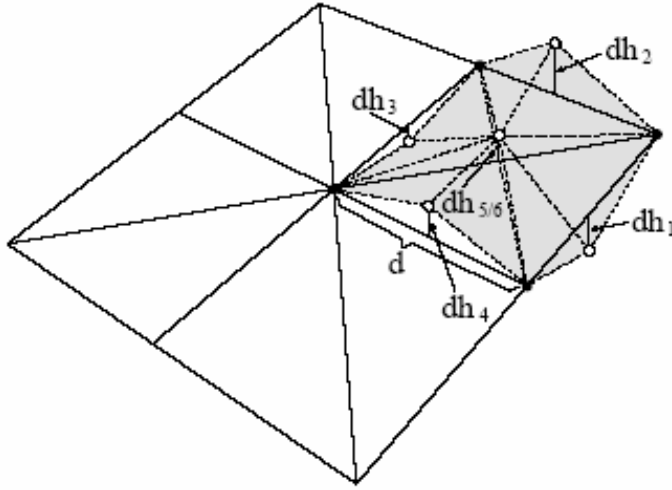
$l$  uzaklığı, etkin hesaplamaların gerçekleştirilmesi için  $L^1$ - normuna göre hesaplanmaktadır.

Arazi üzerinde noktalar arası yükseklik farkının fazla olduğu bölgelerdeki detayın, düz bölgelere göre daha fazla olması gerekmektedir. Bu sebeple her düğüm için hata değerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu hata değeri,

$$d_2 = (1/d) * \text{maksimum } |dh_i| \quad (2)$$

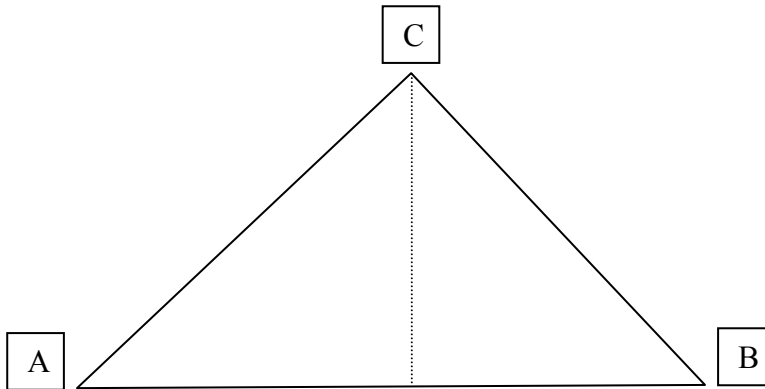
formülü (teknik 1) ile hesaplanmaktadır (Pajarola 1999, 2002).

$dh_i$  değerleri, bir düğümün dört kenarının orta noktaları ve düğümün merkezi için hesaplanmış yükseklik farklarıdır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8  $dh_i$  değerleri

C noktası (Şekil 2.9) xy düzleminde A ve B noktalarının oluşturduğu kenarın orta noktası kabul edilirse;



Şekil 2.9 Kenar ve orta noktası

AB kenarı için yükseklik farkı,

$$|C_y - (A_y + B_y) / 2| \quad (3)$$

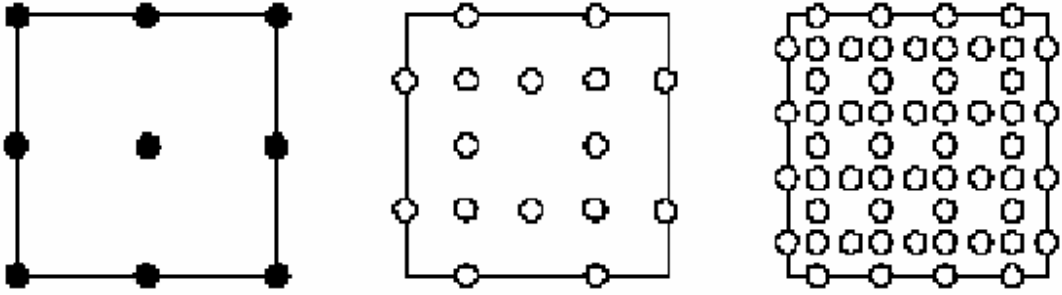
formülü ile hesaplanmaktadır.  $A_y, B_y, C_y$  sırasıyla A, B ve C noktalarının yükseklik değerleridir.

Kamera veya bakan kişiye olan uzaklık ve hata değerleri parametrelerinden yola çıkarak,

$$f = 1/(d * C * maksimum (c * d^2, 1)), \quad (4)$$

formülü elde edilmektedir. Formüldeki  $c$  sabiti, istenen global çözünürlük değeridir.  $f < 1$  şartını sağlayan düğümler için dörde bölme işlemi devam edecektir.

$f \geq 1$  olan düğümlerde çözünürlük doyuma ulaşmıştır ve bölme işlemi yapılmayacaktır. Bu işlemlerin sonucunda oluşturulacak üç boyutlu model üzerinde gösterilecek noktalar belirlenmektedir (Pajarola 1999, 2002).



Şekil 2.10 Yukarıdan aşağıya üçgenleştirme metodunun üç seviye ilerlemesi

### 2.3 Üç Boyutlu Modelin Doğruluğunun Hesaplanması

Üç boyutlu modelin doğruluğu, işlem zamanı, hafıza gereksinimi, gerçek-zamanlı işleyebilme ve oluşturulan modeldeki üçgen sayısı; kullanılan tekniği değerlendirme kriterleridir.

Coğrafi Bilgi Sistemleri açısından bakılacak olursa, değerlendirme, üç boyutlu modelin doğruluğu ve modeldeki üçgen sayısı temelli olmalıdır. Üç boyutlu modelin doğruluğu, modelin gerçek araziye benzerliğini saptayan bir ölçüdür. Bu ölçü, arazideki noktalar ve bunlara karşılık modelde yer alan noktaların yükseklik farkları hesaplanarak elde edilmektedir. Bütün noktalar için yükseklik farkı değerleri elde edildikten sonra aşağıdaki formül kullanılarak modelin doğruluğu hesaplanmaktadır:

$$dogruluk = 100 * ((toplamYükseklik - toplamDelta) / toplamYükseklik) \quad (5)$$

*toplamYükseklik*, arazi üzerindeki bütün noktaların yüksekliklerinin toplamıdır.

*toplamDelta* ise, arazideki noktalar ve bunlara karşılık modelde yer alan noktaların yükseklik farklarının toplamıdır.

Üç boyutlu modeldeki üçgen sayısı ise kolaylıkla hesaplanabilmektedir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Sınırlandırılmış dörtlü ağaç algoritması temel alınarak yapılan çalışmalarda, bir arazinin, orijinal algoritmadan daha az veya orijinal algoritmayla eşit sayıda üçgene karşılık daha yüksek doğruluğa sahip üç boyutlu modelini oluşturabilmek hedeflenmiştir. Bu amaçla üç adet hata hesaplama tekniği önerilmiş ve bu tekniklerden farklı iki yaklaşımda faydalanılmıştır.

$2^{n+1} * 2^{n+1}$  boyutlu bir yükseklik dosyası girdi olarak alınarak sınırlandırılmış dörtlü ağaç algoritması ile ağ yapısı oluşturulmuştur. Başlangıç düğümü (kök), dosyada yer alan noktaların tamamını içeren matris olarak belirlenmiştir. Bu düğümde ve dörde bölünme sonucu elde edilen her düğümde, doğru veya yanlış değerlerini alan bölme kriteri belirlenip kaydedilmektedir. Kriterin doğru olması, ulaşılabilecek maksimum çözünürlük seviyesine ulaşılmadığı anlamına gelmektedir ve bu durumda bölme işlemi devam etmektedir.

#### 3.1 Önerilen Hata Hesaplama Teknikleri

Yükseklik dosyalarındaki noktaların hatalarını hesaplamak için önerilen iki yaklaşımda da orijinal hata hesaplama tekniği (teknik 1) ve aşağıda önerilen üç hata hesaplama tekniği (teknik 2, teknik 3, teknik 4) kullanılmıştır.

##### 3.1.1 Önerilen birinci hata hesaplama tekniği (teknik 2)

Adım 1: Bir düğüme ait dokuz noktanın yükseklik değerlerinin ortalamasını hesapla (Şekil 3.1).

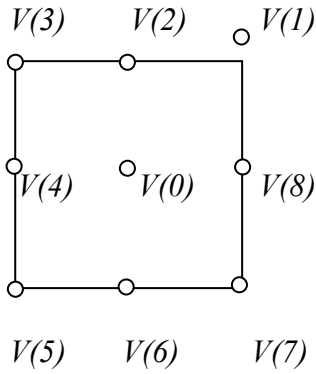
$$ort = \sum_{i=0}^8 H(i)/9, \quad (6)$$

Adım 2: Hesaplanan ortalama değeri ile dokuz noktanın yükseklik değerleri arasındaki farkı hesapla.

$$E(i) = |H(i) - ort|, i = 0, 1, \dots, 8, \quad (7)$$

Adım 3: Adım 2' de hesaplanan fark değerlerinden en büyüğünü düğüme ait hata olarak işaretleyin.

$$d2 = \text{maksimum}(E(i)), i = 0, 1, \dots, 8, \quad (8)$$



Şekil 3.1 Dörtlü ağaç düğümüne ait dokuz nokta

### 3.1.2 Önerilen ikinci hata hesaplama tekniği (teknik 3)

Adım 1: Bir düğüme ait dokuz noktanın yükseklik değerlerinin en büyüğünü bul (Şekil 3.1).

$$\text{maksimum} = \text{maksimum}(H(i)), i = 0, 1, \dots, 8, \quad (9)$$

Adım 2. Bir düğüme ait dokuz noktanın yükseklik değerlerinin en küçüğünü bul.

$$\text{minimum} = \text{minimum}(H(i)), i = 0, 1, \dots, 8, \quad (10)$$

Adım 3: Maksimum ve minimum değerleri arasındaki farkı düğüme ait hata olarak işaretleyin.

$$d2 = \text{maksimum} - \text{minimum}, \quad (11)$$

### 3.1.3 Önerilen üçüncü hata hesaplama tekniği (teknik 4)

Adım 1: Bir düğüme ait dokuz noktanın yükseklik değerlerine ait medyan değerini bul (Şekil 3.1).

$$med = medyan(H(i)), i = 0,1,\dots,8, \quad (12)$$

Adım 2: Bulunan medyan değeri ile dokuz noktanın yükseklik değerleri arasındaki farkı hesapla.

$$E(i) = |H(i) - med|, i = 0,1,\dots,8 \quad (13)$$

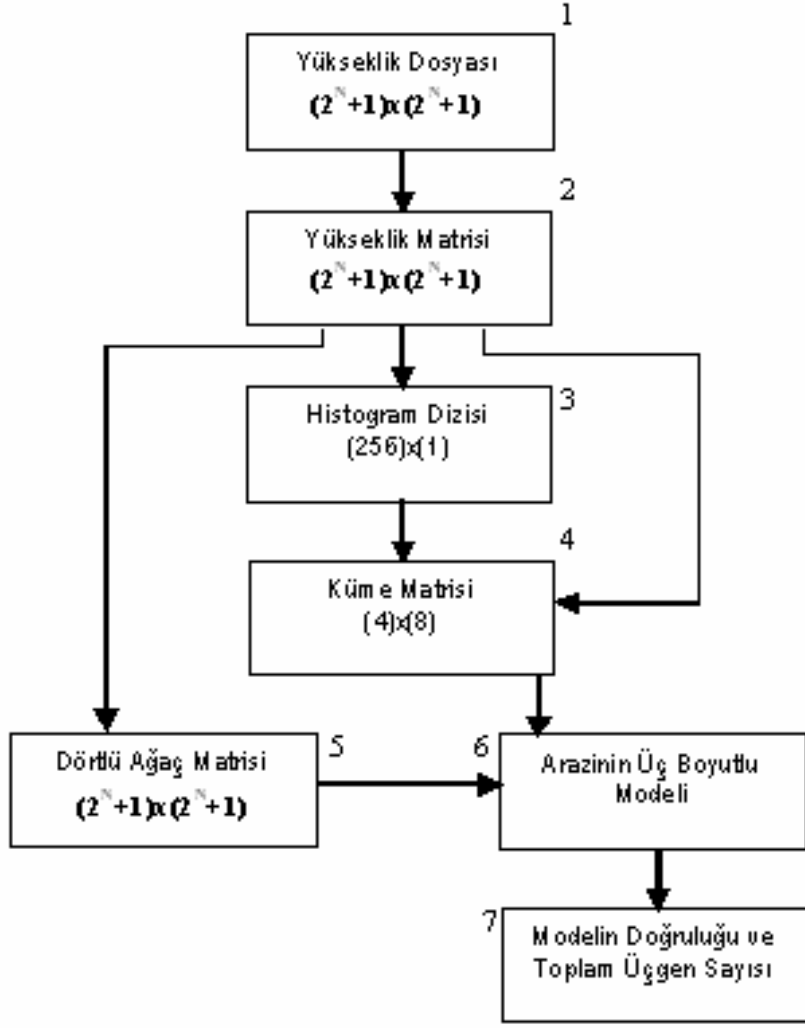
Adım 3: Adım 2' de hesaplanan fark değerlerinden en büyüğünü düğüme ait hata olarak işaretle.

$$d2 = maksimum(E(i)), i = 0,1,\dots,8 \quad (14)$$

## 3.2 Birinci Yaklaşım

Bu yaklaşım, modellenecek arazinin, yükseklik verilerine göre dört ayrı kümeye bölünmesini önermektedir. Dört kümenin de başlangıç ve bitiş yükseklik değerlerine göre, arazi üzerindeki noktaların hangi kümeye denk geldiği bulunmaktadır. Dört kümenin her birine bir orijinal ve üç önerilen hata hesaplama tekniklerinden biri atanmaktadır. Böylelikle arazinin tamamına tekniklerin kombinasyonu uygulanmış olmaktadır. Yapılan çalışmada, örnek araziler üzerinde bu dört tekniğin tüm uygulama sırası kombinasyonları denenmiştir. Tüm kombinasyonlar, oluşan modelin doğruluğu ve üçgen sayısı değerleri açısından karşılaştırılmıştır. Böylelikle, yükseklik verilerine göre en uygun teknik kombinasyonunun kullanılması sağlanmıştır. Yaklaşım dört adımdan oluşmaktadır.





Şekil 3.2 Birinci yaklaşıma ait blok diyagram

### 3.2.1 Birinci adım (1. ve 2. bloklar)

İlk adımda arazinin yükseklik bilgisi dosyadan matrise aktarılmaktadır. Bu matris yükseklik matrisi olarak adlandırılmaktadır.

### 3.2.2 İkinci adım (3. ve 4. bloklar)

Arazi üzerindeki noktaların yüksekliklerinin (0-255) histogramı hesaplanarak 256 elemanlı histogram dizisi elde edilmiştir. Başlangıç olarak yükseklik aralıkları 0-127 ve 128-255 olan iki küme yaratılmıştır. Histogram dizisinden faydalanılarak, daha fazla noktanın yer aldığı küme tekrar ikiye bölünmüştür. Bu işlem, kümenin başlangıç ve bitiş yükseklik değerleri arasındaki fark 32'den büyük kaldığı sürece devam ettirilerek toplam dört küme elde edilmiştir.

### 3.2.3 Üçüncü adım (5. ve 6. bloklar)

$(2^{N+1}) \times (2^{N+1})$  boyutlu araziye karşılık olarak dörtlü ağaç yapısı oluşturulmuştur. Ağaç yapısında her düğümün ya dört çocuk düğümü vardır ya da hiç yoktur. Hiç çocuğu olmayan düğümler yaprak düğümlerdir.

Dörtlü ağaç yapısını temsil etmek için arazinin boyutlarında bir matris kullanılmıştır. Ağaç yapısındaki her düğüm, dörtlü ağaç matrisindeki bölme ölçütüne eşit değerlerden birine karşılık gelmektedir. Dörtlü ağaç matrisini oluşturabilmek için, en üst seviyeden aşağıya doğru, her düğümün detay seviyesinin doğruluğu kontrol edilerek dört çocuk düğüme bölünüp bölünmeyeceğine karar verilmiştir.

Bir düğüm için üçgenleştirme sürecinde, düğüme ait dokuz noktanın yüksekliklerinin aritmetik ortalaması alınmıştır. Ortalama değeri, düğüme ait yükseklik değeridir. İkinci adımda elde edilen kümelerin yükseklik aralıkları ile düğümün yüksekliği karşılaştırılarak düğümün ait olduğu küme bulunmuştur. Kümeye atanmış olan hata hesaplama tekniği, düğümün hatasının hesaplanmasında kullanılmıştır.

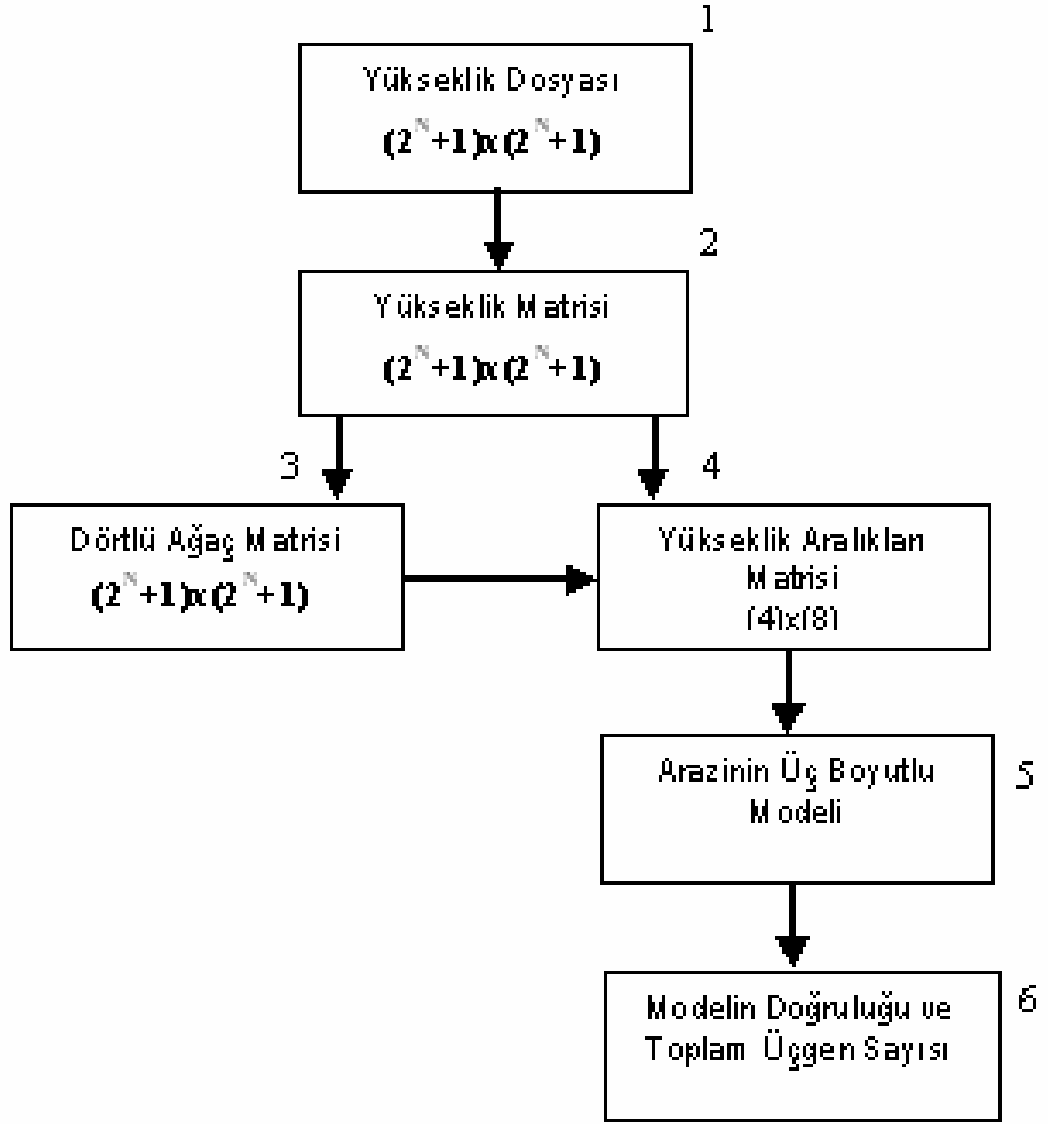
### **3.2.4 Dördüncü adım (7. blok)**

Kümelere uygulanacak tekniklerin uygulama sıralarının tüm kombinasyonları için model doğruluğu değerleri ve toplam üçgen sayıları hesaplanmıştır.

Üçgenlerin köşelerinde bulunan noktalar için delta değeri sıfıra eşittir. Diğer noktalar için delta değeri hesaplanırken, üçgenlerin etrafını çeviren iki boyutlu bir dörtgen tanımlanmış ve her üçgen için düzlem denklemi hesaplanmıştır. Düzlem denklemleri (<http://mathworld.wolfram.com/Plane.html>, 2006) kullanılarak bir noktanın bir üçgen içerisinde olup olmadığı kontrol edilmiş ve eğer içerisindeyse delta değeri hesaplanmıştır.

### **3.3 İkinci Yaklaşım**

Bu yaklaşım, modellenecek arazinin, yükseklik verilerine göre aralıklara ayrılmasını ve bu yükseklik aralıklarına denk gelen noktalar için farklı çözünürlük parametreleri kullanılmasını önermektedir. Çözünürlük parametrelerinin yükseklik aralıklarına göre hesaplanması için iki teknik önerilmektedir. Yaklaşım üç adımdan oluşmaktadır.



Şekil 3.3 İkinci yaklaşıma ait blok diyagram

### 3.3.1 Birinci adım (1. ve 2. bloklar)

İlk adımda arazinin yükseklik bilgisi dosyadan matrise aktarılmaktadır. Bu matris yükseklik matrisi olarak adlandırılmaktadır.

### 3.3.2 İkinci adım (3., 4. ve 5. bloklar)

$(2^N+1) \times (2^N+1)$  boyutlu araziye karşılık olarak dörtlü ağaç yapısı oluşturulmuştur. Ağaç yapısında her düğümün ya dört çocuk düğümü vardır ya da hiç yoktur. Hiç çocuğu olmayan düğümler yaprak düğümlerdir.

Dörtlü ağaç yapısını temsil etmek için arazinin boyutlarında bir matris kullanılmıştır. Ağaç yapısındaki her düğüm, dörtlü ağaç matrisindeki bölme ölçütüne eşit değerlerden birine karşılık gelmektedir. Dörtlü ağaç matrisini oluşturabilmek için, en üst seviyeden aşağıya doğru, her düğümün detay seviyesinin doğruluğu kontrol edilerek dört çocuk düğüme bölünüp bölünmeyeceğine karar verilmiştir.

Yükseklik aralıklarının sayısı ve aralıkların başlangıç ve bitiş yükseklik değerlerinin belirlenmesinden sonra, orijinal tekniği ve önerilen yaklaşımı sabit ve dinamik çözünürlük parametreleri ile kullanarak üç boyutlu modeller elde edilmiştir.

### 3.3.3 Üçüncü adım (6. blok)

Elde edilen modeller için model doğruluğu değerleri ve toplam üçgen sayıları hesaplanmıştır.

Üçgenlerin köşelerinde bulunan noktalar için delta değeri sıfıra eşittir. Diğer noktalar için delta değeri hesaplanırken, üçgenlerin etrafını çeviren iki boyutlu bir dörtgen tanımlanmış ve her üçgen için düzlem denklemi hesaplanmıştır. Düzlem denklemleri (<http://mathworld.wolfram.com/Plane.html>, 2006) kullanılarak bir noktanın bir üçgen

içerisinde olup olmadığı kontrol edilmiş ve eğer içerisindeyse delta değeri hesaplanmıştır.

### 3.3.4 Çözünürlük parametrelerinin hesaplanması

Çözünürlük parametreleri hesaplanmadan önce, kullanılacak yükseklik aralığı sayısı, aralıkların başlangıç ve bitiş yükseklik değerleri tanımlanmalıdır.

Adım 1: Bir düğüme ait dokuz noktanın yükseklik değerlerinin ortalamasını hesapla (6). Hesaplanan değeri o düğüme ait yükseklik olarak işaretle.

Adım 2: Düğümün hesaplanmış yüksekliğe göre hangi aralığa denk geldiğini tespit et. Tespit edilen yükseklik aralığının numarası, o düğüme ait hata değeri hesaplanırken  $c$  parametresi olarak kullanılacaktır.

Adım 3: Düğümün seviyesini hesapla. Seviye aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$C = \log_2(d) \quad (15)$$

Bulunan seviye değeri, o düğüme ait hata değeri hesaplanırken  $C$  parametresi olarak kullanılacaktır.

Belirtilen yaklaşımların simülasyonu, C programlama dili kullanılarak kodlanmış ve noktaların birleştirilerek üçgenlerin oluşturulması ve ekranda gösterilmesi aşamasında OpenGL (Wright *et al* 2004) fonksiyonlarından faydalanılmıştır. Giriş verisi olarak kullanılan dosyalar, arazilere ait yükseklik verilerini içeren raw tipinde dosyalardır. Çizelge 3.1, kullanılan iki dosyanın özelliklerini ve parametre değerlerini göstermektedir.

Çizelge 3.1 Dosya özellikleri ve parametre değerleri

	Dosya Adı	
	test1.raw	test2.raw
Dosya Boyutu	513*513	2049*2049
c Değeri	2	2
C Değeri	5	5
Bakış Açısı x Koordinatı	200	200
Bakış Açısı y Koordinatı	200	200
Bakış Açısı z Koordinatı	170	170

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yükseklik verisi içeren iki dosyaya, orijinal hata hesaplama tekniği ve önerilen üç hata hesaplama tekniği, önerilen iki yaklaşım dahilinde uygulanarak, sınırlandırılmış dörtlü ağaç temelli olarak üç boyutlu modeller elde edilmiştir. Elde edilen modeller, doğruluk ve üçgen sayısı değerlerine göre karşılaştırılmıştır.

### 4.1 Birinci Yaklaşım Ait Bulgular

Öncelikle her iki veri dosyasına da orijinal teknik uygulanmıştır. İkinci ve üçüncü uygulamalar ise yaklaşımın veri dosyalarında test edilmesi ile gerçekleştirilmiştir.

#### 4.1.1 Uygulama 1: teknik 1

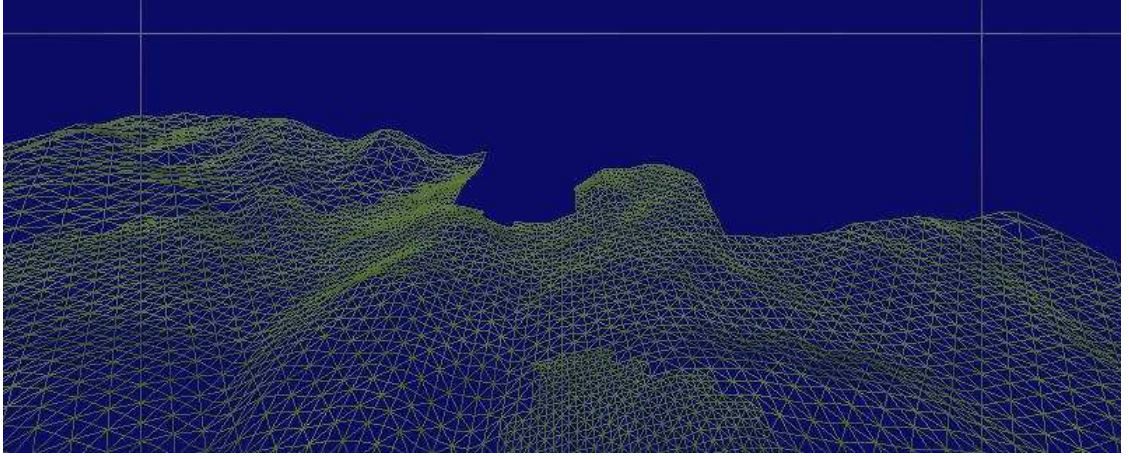
Veri dosyalarına öncelikle teknik 1 (orijinal teknik) uygulanmıştır. Orijinal teknik ve önerilen tekniklerin sonuçlarını kıyaslayabilmek amacıyla, her bir dosya için dört farklı doğruluk değeri ve üçgen sayısı elde edilmiştir. Bu değerler Çizelge 4.1’ de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1 teknik 1’ e ait sonuçlar

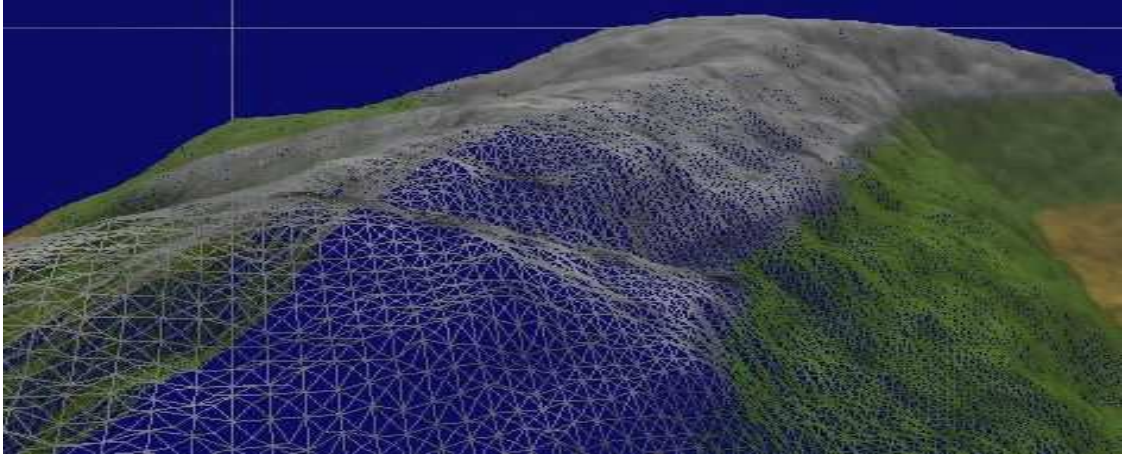
Dosya	Üçgen Sayısı	Doğruluk	Dosya	Üçgen Sayısı	Doğruluk
test1.raw	7773	99,581%	test2.raw	147507	99,840%
test1.raw	9749	99,590%	test2.raw	148003	99,843%
test1.raw	11711	99,601%	test2.raw	148507	99,845%
test1.raw	12511	99,607%	test2.raw	149507	99,850%

Elde edilen üç boyutlu modeller aşağıda gösterilmektedir.





Şekil 4.1 test1.raw dosyasına teknik 1' in uygulanması ile elde edilen üç boyutlu model



Şekil 4.2 test2.raw dosyasına teknik 1' in uygulanması ile elde edilen üç boyutlu model

#### 4.1.2 Uygulama 2: yaklaşımın ilk veri dosyasına uygulanması

Dört küme elde edildikten sonra, dört tekniği içeren tüm kombinasyonlar sırayla denenmiştir. Kümelerin özellikleri Çizelge 4.2' de gösterilmektedir.

Çizelge 4.2 test1.raw dosyasına ait dört kümenin özellikleri

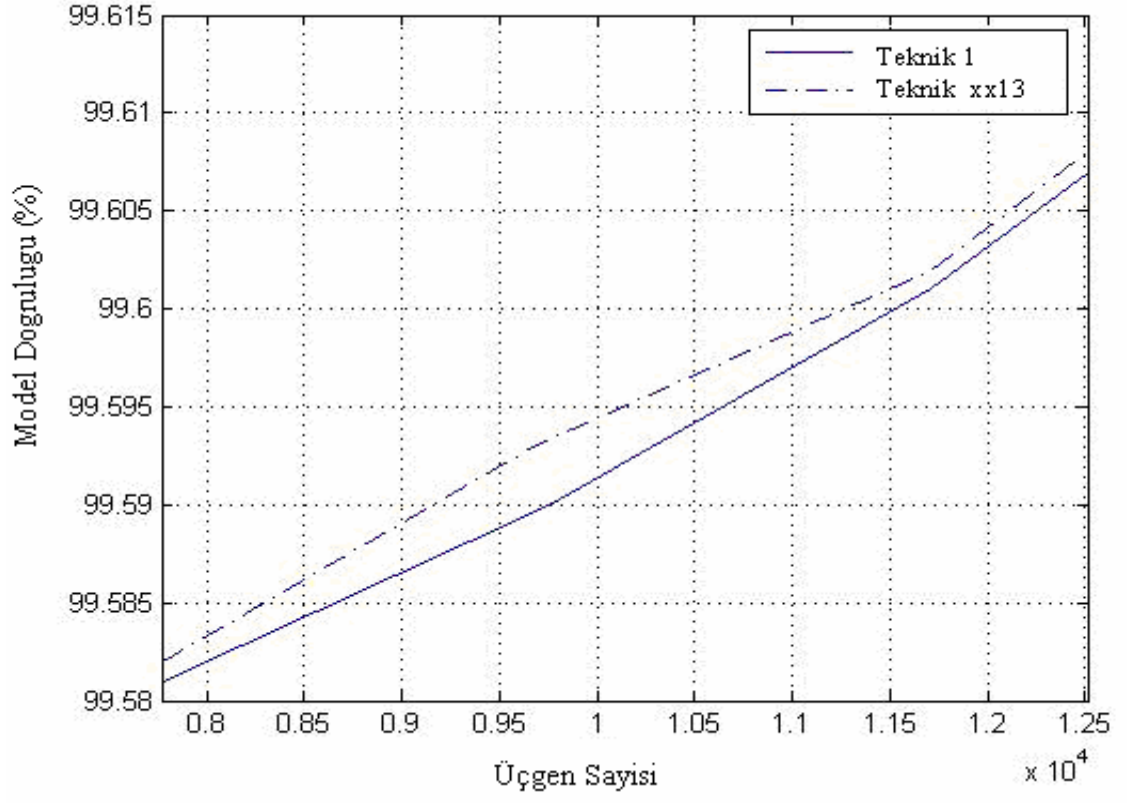
Dosya	Küme Numarası	Başlangıç Yüksekliği	Bitiş Yüksekliği	Kümedeki Nokta Sayısı
test1.raw	1	128	255	51904
test1.raw	2	0	63	0
test1.raw	3	64	95	76566
test1.raw	4	96	127	134699

İlk veri dosyası olan test1.raw için, son iki basamağı 13 olan teknik kombinasyonlarının tümü, orijinal teknikten daha iyi sonuç vermiştir. Örneğin; orijinal teknik 9749 üçgene karşılık %99,590 oranında model doğruluğu üretmişken, birinci yaklaşım 9682 üçgene karşılık %99,593 oranında model doğruluğu üretmiştir. Orijinal teknikten daha az sayıda üçgene karşılık daha yüksek model doğruluğu sağlayan kombinasyonlar Çizelge 4.3’ te olduğu gibidir. Yaklaşım, Uygulama 1’ deki dört farklı üçgen sayısına yakın değerler için test edilmiştir.

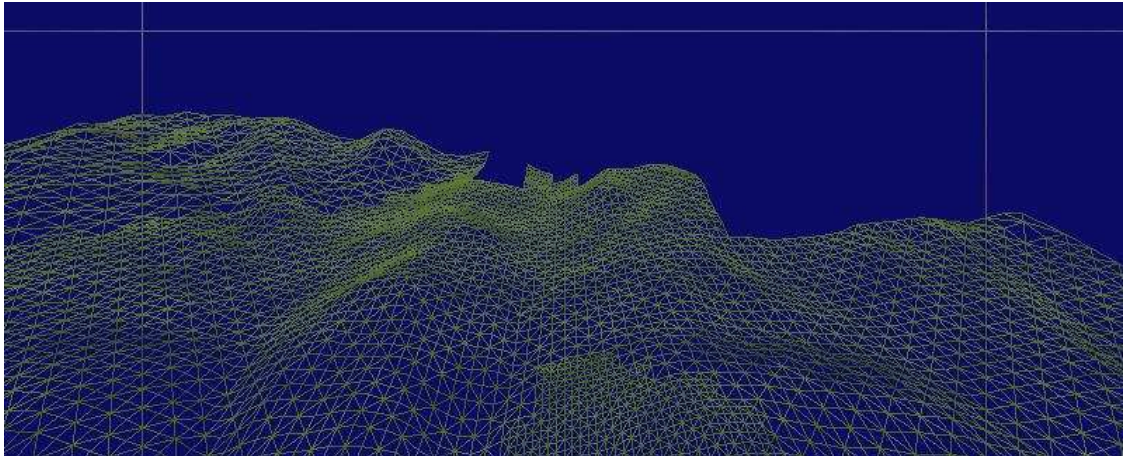
Çizelge 4.3 Birinci yaklaşımın test1.raw dosyasına ait sonuçları

Dosya	Üçgen Sayısı	Doğruluk
test1.raw	7770	99,582%
test1.raw	9682	99,593%
test1.raw	11708	99,602%
test1.raw	12508	99,608%

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4, Uygulama 2’ nin sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 4.3 test1.raw dosyasına ait üç boyutlu modelin doğruluk ve üçgen sayısı değerleri



Şekil 4.4 test1.raw dosyasıyla Uygulama 2' nin sonucunda elde edilen üç boyutlu model

### 4.1.3 Uygulama 3: yaklaşımın ikinci veri dosyasına uygulanması

Dört küme elde edildikten sonra, dört tekniği içeren tüm kombinasyonlar sırayla denenmiştir. Kümelerin özellikleri Çizelge 4.4’ te gösterilmektedir.

Çizelge 4.4 test2.raw dosyasına ait dört kümenin özellikleri

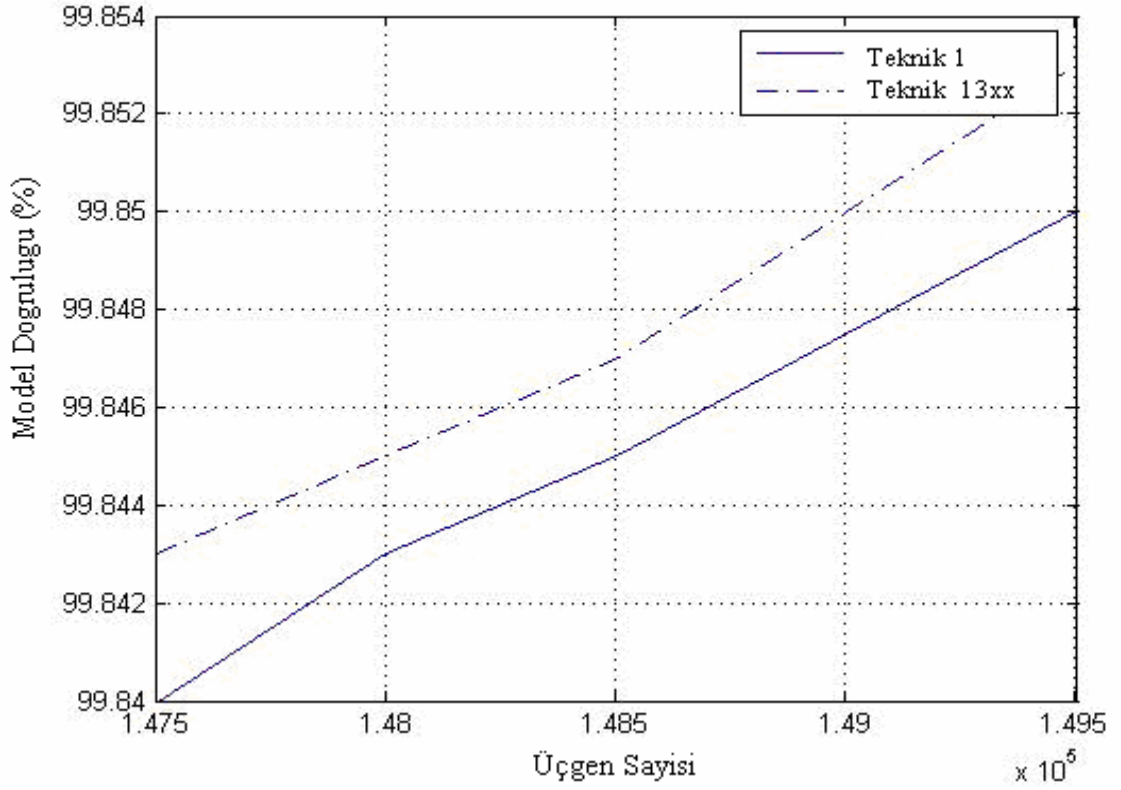
Dosya	Küme Numarası	Başlangıç Yüksekliği	Bitiş Yüksekliği	Kümedeki Nokta Sayısı
test2.raw	1	128	255	123290
test2.raw	2	64	127	56152
test2.raw	3	32	63	30061
test2.raw	4	0	31	53666

İkinci veri dosyası olan test2.raw için, ilk iki basamağı 13 olan teknik kombinasyonlarının tümü, orijinal teknikten daha iyi sonuç vermiştir. Örneğin; orijinal teknik 147507 üçgene karşılık %99,840 oranında model doğruluğu üretmişken, birinci yaklaşım 147502 üçgene karşılık %99,843 oranında model doğruluğu üretmiştir. Orijinal teknikten daha az sayıda üçgene karşılık daha yüksek model doğruluğu sağlayan kombinasyonlar Çizelge 4.5’ te olduğu gibidir. Yaklaşım, Uygulama 2’ deki dört farklı üçgen sayısına yakın değerler için test edilmiştir.

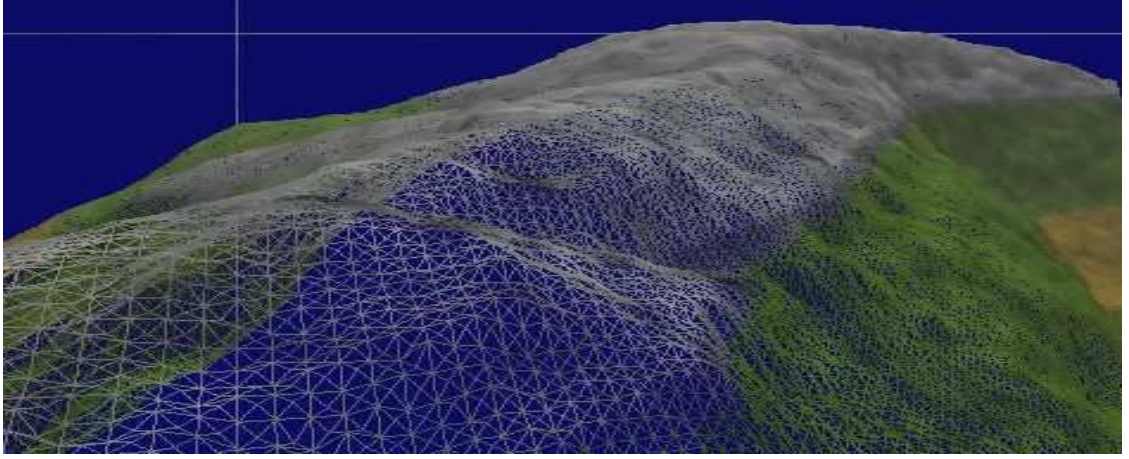
Çizelge 4.5 Birinci yaklaşımın test2.raw dosyasına ait sonuçları

Dosya	Üçgen Sayısı	Doğruluk
test2.raw	147502	99,843%
test2.raw	148002	99,845%
test2.raw	148503	99,847%
test2.raw	149503	99,853%

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6, Uygulama 2' nin sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 4.5 test2.raw dosyasına ait üç boyutlu modelin doğruluk ve üçgen sayısı değerleri



Şekil 4.6 test2.raw dosyasıyla Uygulama 2' nin sonucunda elde edilen üç boyutlu model

Uygulama sonuçları; ilk veri dosyası için, 1 ve 3 numaralı tekniklerin son iki sırada olduğu; ikinci veri dosyası içinse 1 ve 3 numaralı tekniklerin ilk iki sırada olduğu kombinasyonların orijinal teknikten daha az sayıda üçgenle daha yüksek model doğruluğu sağladığını göstermektedir. Son iki sıra son iki kümeyi, ilk iki sıra ise ilk iki kümeyi göstermektedir. Bu kümeler Çizelge 4.2 ve 4.4' te de görüldüğü üzere diğerlerinden daha fazla nokta içermektedirler. 1 ve 3 numaralı teknikler daha büyük hata değerleri üretmekte ve böylelikle daha fazla üçgen oluşturmaktadırlar. Bu sebeple, bu kümelerdeki noktalara ait delta değerleri azalmaktadır. Geriye kalan ikişer küme ise daha az nokta içermektedir. 2 ve 4 numaralı teknikler de bu kümelerde yer alan noktalardan daha az üçgen oluşmasını sağlamaktadır. Böylelikle artan model doğruluğu değerlerine rağmen toplam üçgen sayısı değerleri azalmaktadır. Sonuç olarak, 1 ve 3 numaralı teknikler, daha fazla nokta içeren kümelere uygulanmalıdır.

#### **4.2 İkinci Yaklaşım Ait Bulgular**

İlk uygulamada her iki veri dosyasında da sabit çözünürlük parametreleri ile orijinal hata hesaplama tekniği ve önerilen üç teknik test edilmiştir. İkinci uygulamada dinamik çözünürlük parametreleri test edilmiştir.

#### **4.2.1 Uygulama 1: sabit çözünürlük parametreleri**

İlk olarak, orijinal hata hesaplama tekniği ve önerilen üç teknik tüm düğümlere sabit çözünürlük parametreleri ile uygulanmıştır. Bu uygulamada, çözünürlük parametreleri kullanıcıdan istenmekte ve üçgenleştirme süreci boyunca değişmemektedir. Uygulama sonuçlarını, Uygulama 2' nin sonuçları ile karşılaştırabilmek için her iki uygulamadaki üçgen sayıları eşit veya yakın olmalıdır. Böylelikle model doğruluğu değerleri karşılaştırılabilmekte ve değerlendirilebilmektedir. Daha iyi değerlendirme yapabilmek için farklı sabit çözünürlük değerleri test edilmiştir. Her iki yükseklik dosyasına ait sonuçlar Çizelge 4.6' da gösterilmektedir.

Çizelge 4.6 Birinci uygulamaya ait sonuçlar

Dosya	Teknik	C parametresi	C Parametresi	Üçgen Sayısı	Model Doğruluğu
test1.raw	1	1	20	152840	99,233%
	1	1	13	63777	98,757%
	1	2	4	25055	98,023%
	2	3	9	71540	98,978%
	2	3	5	24010	98,131%
	2	2	5	10305	97,288%
	3	4	5	163588	99,329%
	3	3	5	96799	99,095%
	3	2	4	27388	98,239%
	4	5	5	106307	99,132%
	4	3	5	37765	98,486%
	4	3	3	13464	97,540%
test2.raw	1	2	6	922893	98,716%
	1	2	4	492739	97,600%
	1	2	2	140934	93,785%
	2	2	8	490543	97,598%
	2	2	5	211478	95,245%
	2	3	3	175479	94,568%
	3	2	7	1208153	99,021%
	3	2	4	496183	97,605%
	3	2	3	294356	96,304%
	4	2	8	517045	97,640%
	4	2	5	222984	95,338%
	4	2	3	89489	91,628%



#### 4.2.2 Uygulama 2: dinamik çözünürlük parametreleri

Bu uygulamada, istenen global çözünürlük parametresi  $c$ , yükseklik aralıkları kullanılarak değer almaktadır. 2, 4 ve 8 adet yükseklik aralığının kullanıldığı durumlar test edilmiştir. Çizelge 4.7, yükseklik aralıklarını ve karşılık gelen  $c$  değerlerini göstermektedir.

Çizelge 4.7 Yükseklik aralıkları ve  $c$  değerleri

Yükseklik Aralığı Sayısı	Başlangıç-Bitiş Yükseklikleri	Karşılık Gelen $c$ Değeri
2	0-127	2
	128-255	1
4	0-63	4
	64-127	3
	128-191	2
	192-255	1
8	0-31	8
	32-63	7
	64-95	6
	96-127	5
	128-159	4
	160-191	3
	192-223	2
	224-255	1

Üçgenleştirme sürecinde, arazi üzerindeki her düğüm için, düğümün yüksekliğinin denk geldiği aralık bulunmaktadır. Bulunan aralığın numarası ilgili düğüm için  $c$  parametresi olarak kullanılmaktadır. Çizelge 4.7’ de de görüldüğü gibi, yükseklik aralıklarının numaraları azalan sıradadır. Bu şekilde azalan sıranın kullanılmasının sebebi, arazinin düşük yükseklikli bölümlerinde büyük  $c$  parametrelerinin kullanılması ve böylece düşük

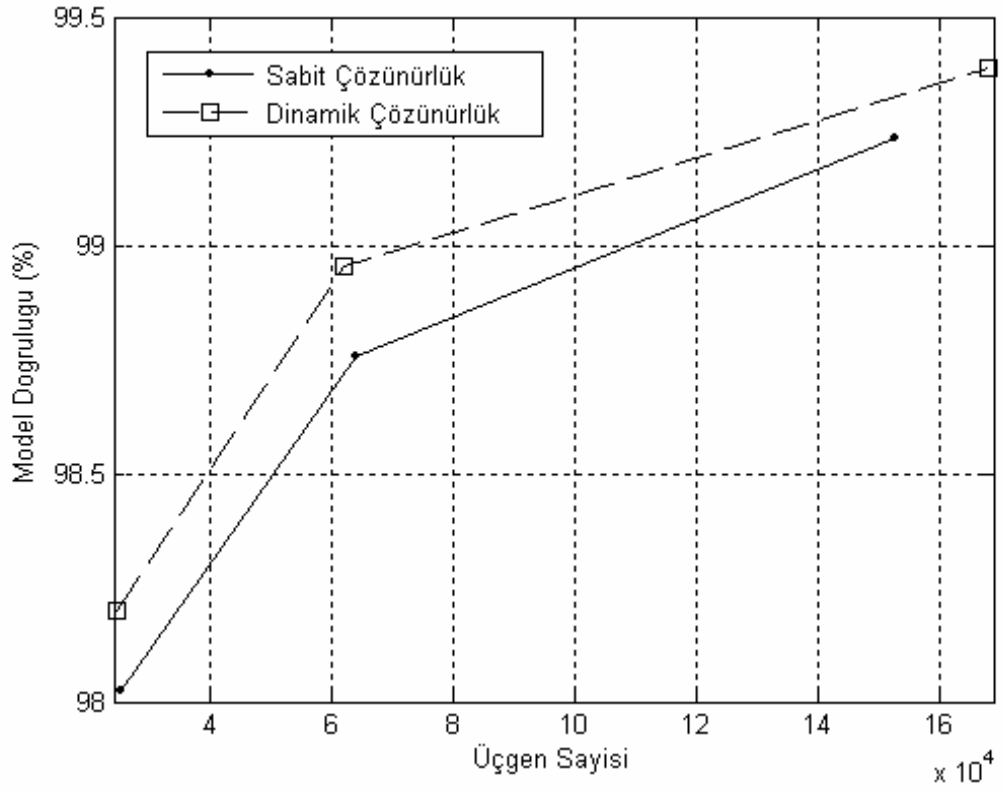
f değerlerinin elde edilerek daha çok üçgen oluşmasını sağlamaktır. C parametresi ise Bölüm 3.3.4' te olduğu gibi her düğüm için ayrı ayrı hesaplanmaktadır.

Çizelge 4.8 İkinci uygulamaya ait sonuçlar

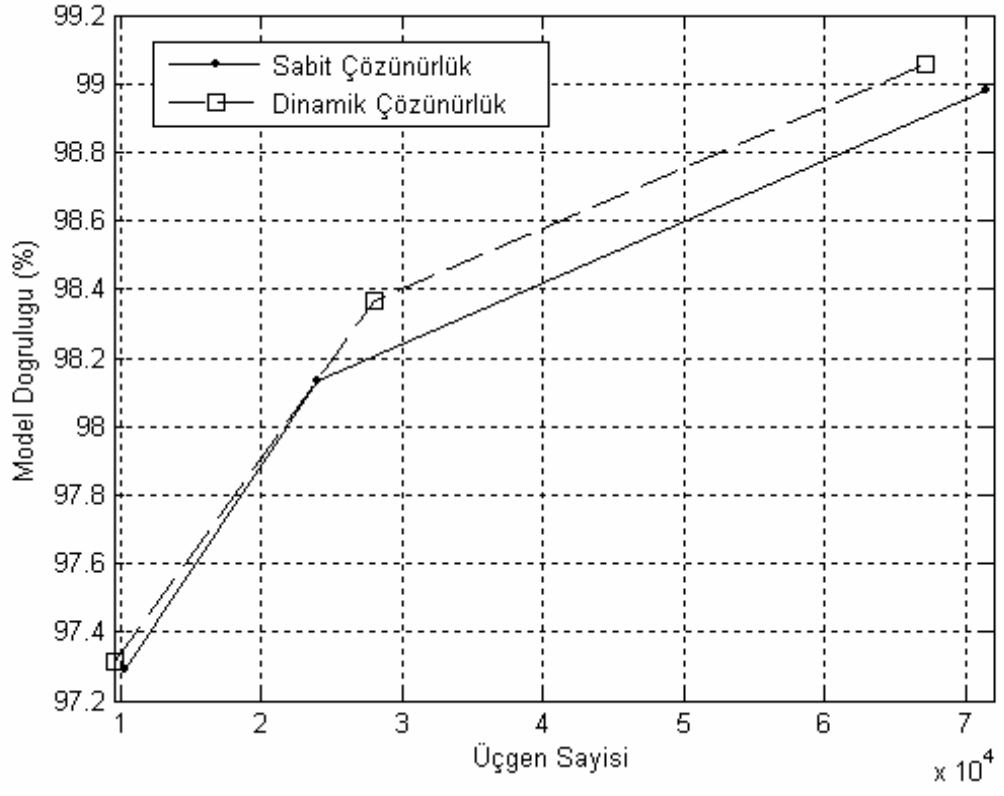
Dosya		test1.raw		test2.raw	
Yükseklik Aralığı Sayısı	Teknik	Üçgen Sayısı	Model Doğruluğu	Üçgen Sayısı	Model Doğruluğu
2	1	24521	98,198%	80500	93,082%
	2	9515	97,314%	192731	96,277%
	3	27977	98,366%	192044	96,271%
	4	12983	97,672%	83182	93,180%
4	1	62025	98,954%	464957	98,200%
	2	27993	98,366%	191167	96,269%
	3	70938	99,060%	468127	98,206%
	4	38285	98,620%	203338	96,330%
8	1	168003	99,388%	1005405	99,064%
	2	67189	99,058%	464555	98,199%
	3	183876	99,440%	1005405	99,064%
	4	102060	99,209%	483785	98,237%

Uygulamaların sonuçları, dört hata hesaplama tekniğinin de dinamik çözünürlük parametreleri ile kullanıldığında daha az üçgene karşılık daha fazla model doğruluğu ürettiğini göstermektedir. Örneğin; teknik 1, test1.raw dosyasında, sabit çözünürlük parametreleri ile (C=2, c=4) 25055 üçgene karşılık %98.023 model doğruluğu üretirken; dinamik çözünürlük parametreleri ile 24521 üçgene karşılık %98.198 model doğruluğu üretmektedir. Önerilen üç hata hesaplama tekniğinden biri, farklı ihtiyaç durumlarına ve teknik koşullara bağlı olarak seçilebilir. Aşağıdaki şekiller, her iki veri dosyası için, dört tekniğin sabit çözünürlük parametreleri ve değişken çözünürlük parametreleri ile uygulandığında elde edilen sonuçları karşılaştırmaktadır. Her şekil iki eğri içermektedir.

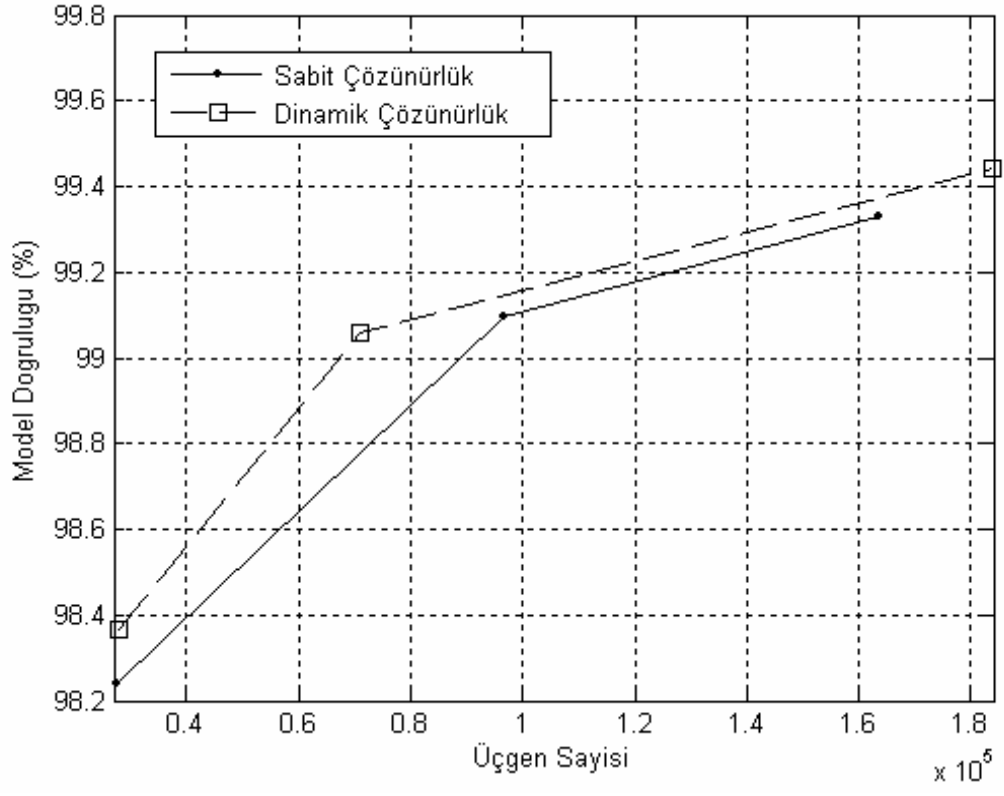
Kesik olan eğriler 2, 4 ve 8 yükseklik aralığı kullanılan durumları göstermektedir ve buna bağlı olarak üç noktadan oluşmaktadır. Diğer eğriler ise Uygulama 1' in sonuçları olup sabit çözünürlük parametrelerinin kullanımının sonuçlarını belirtmektedir. Her şekil, dört teknikten birine aittir ve iki veri dosyası için toplam sekiz şekil bulunmaktadır.



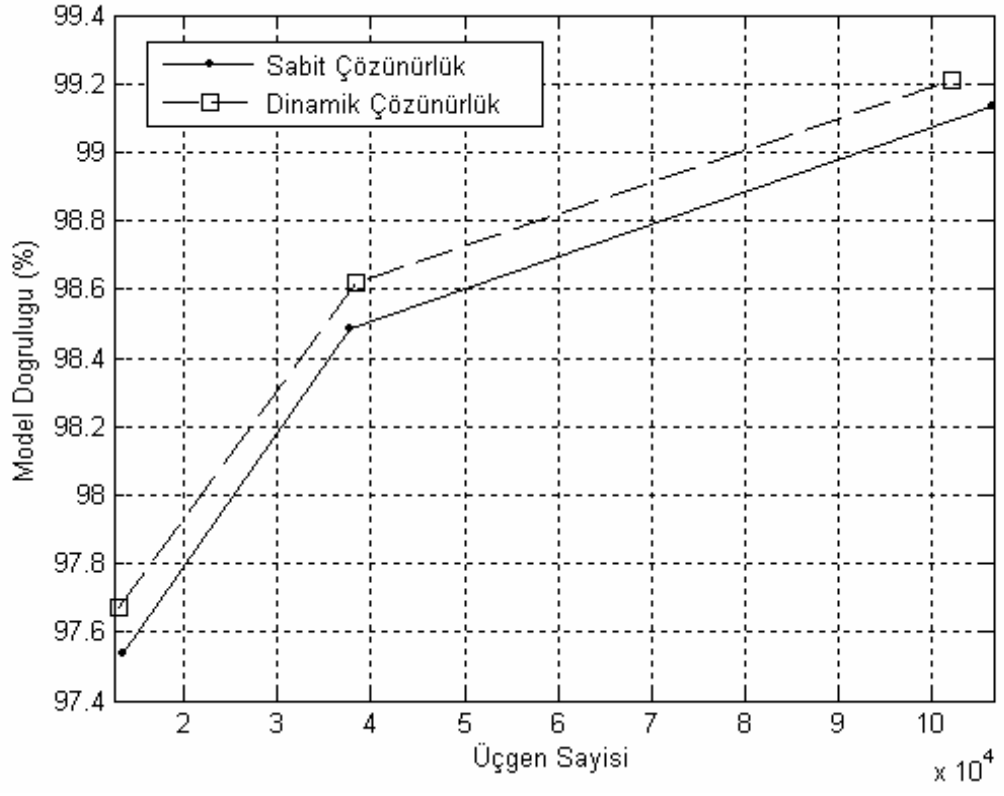
Şekil 4.7 test1.raw dosyası için teknik 1' in sonuçları



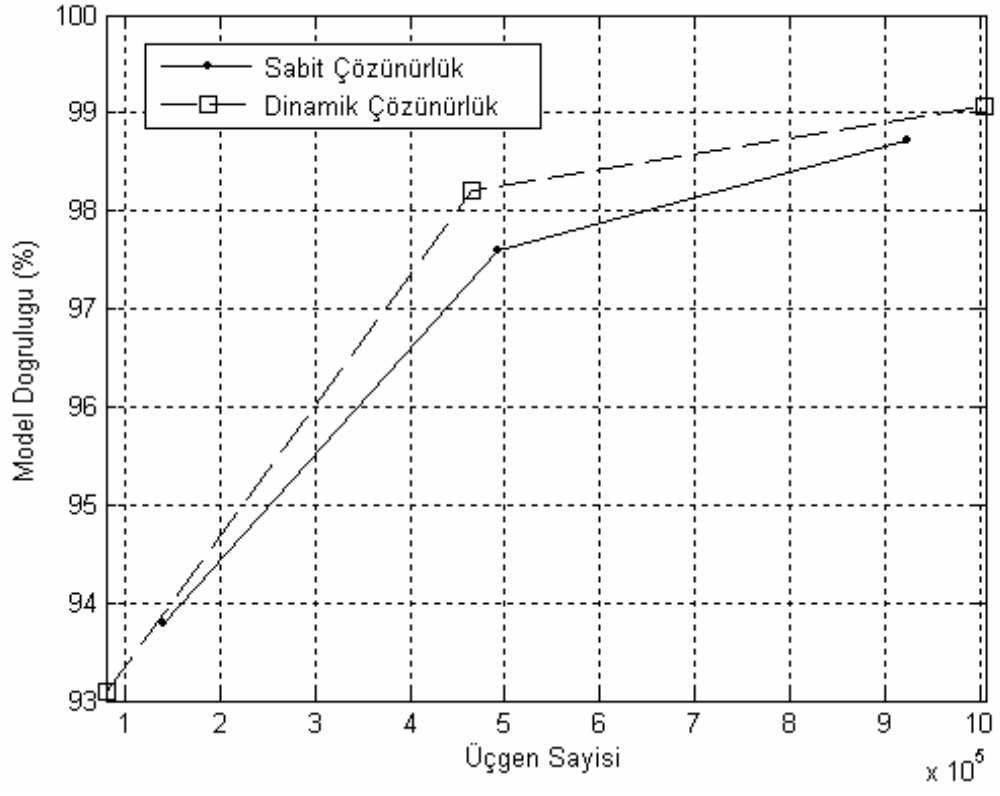
Şekil 4.8 test1.raw dosyası için teknik 2' nin sonuçları



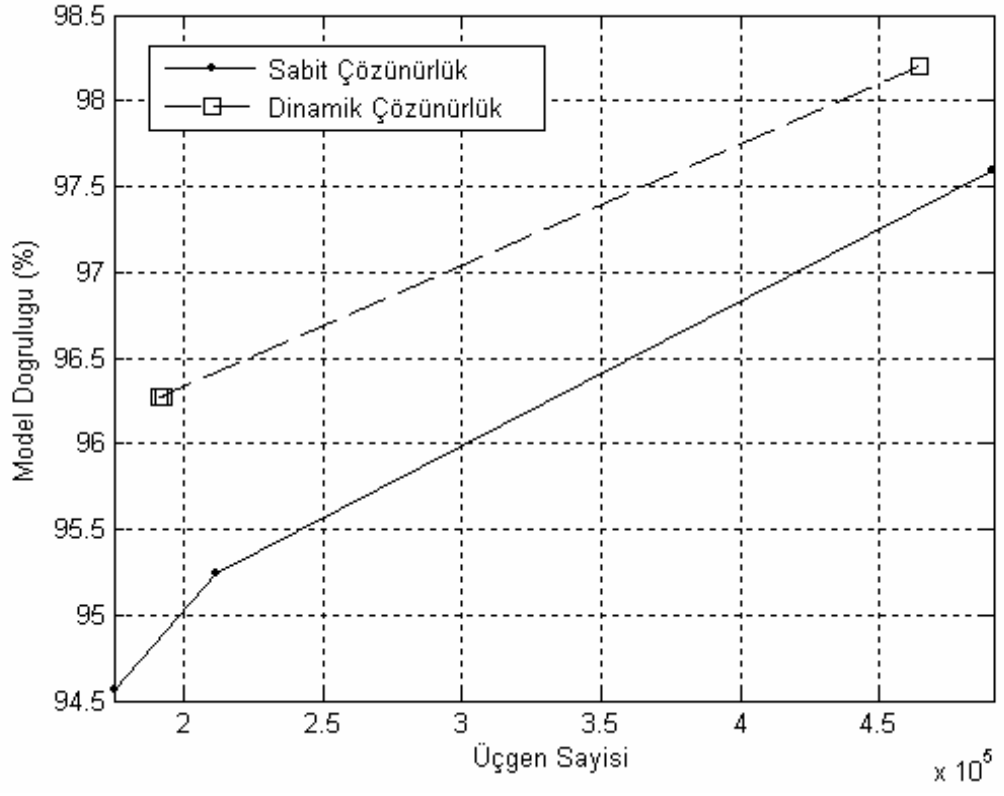
Şekil 4.9 test1.raw dosyası için teknik 3' ün sonuçları



Şekil 4.10 test1.raw dosyası için teknik 4' ün sonuçları

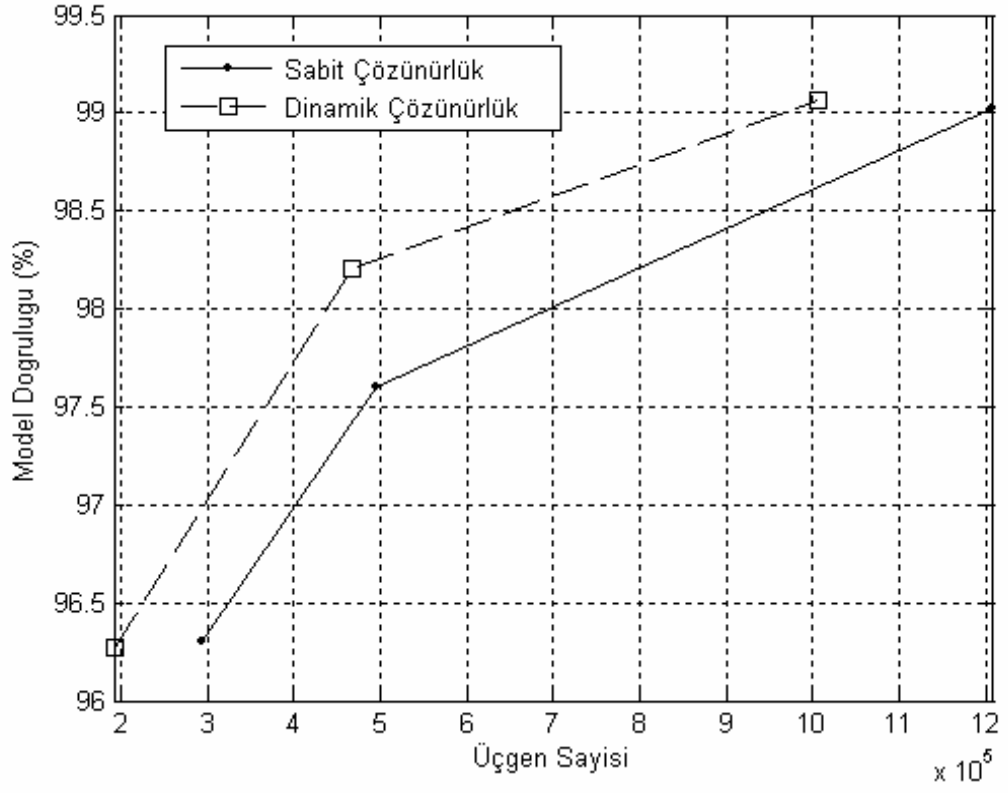


Şekil 4.11 test2.raw dosyası için teknik 1' in sonuçları

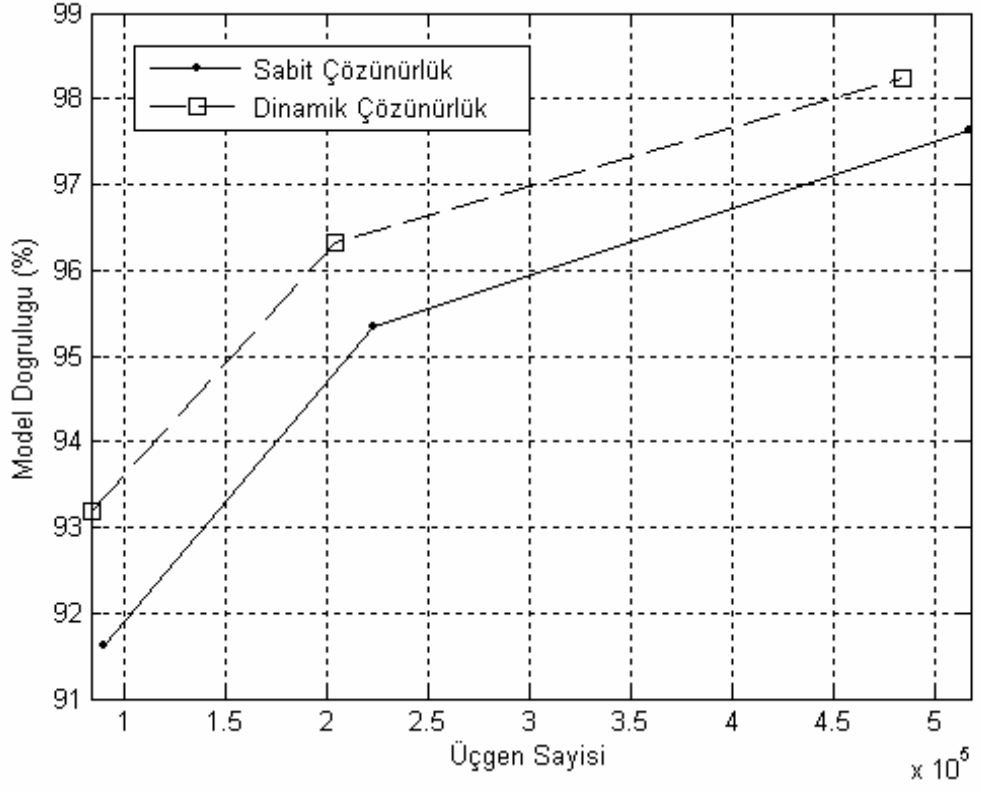


Şekil 4.12 test2.raw dosyası için teknik 2' nin sonuçları

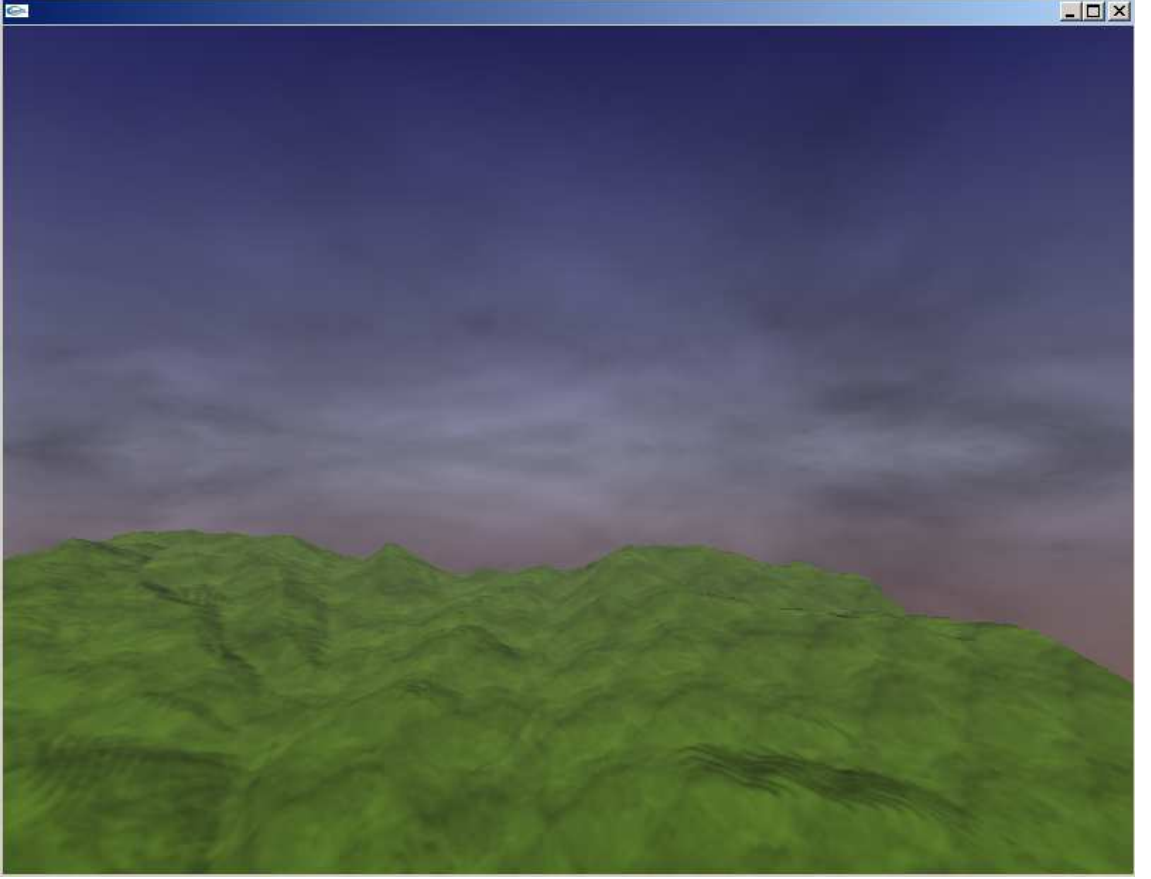




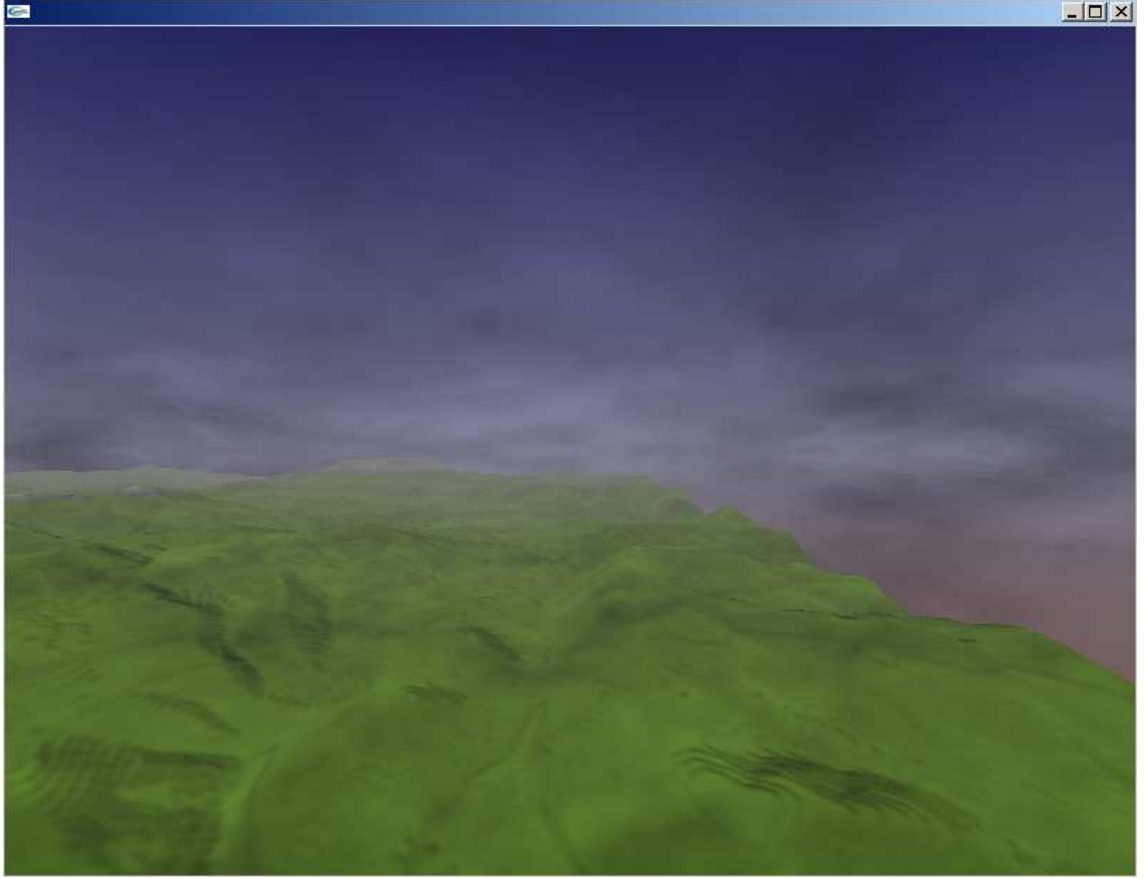
Şekil 4.13 test2.raw dosyası için teknik 3' ün sonuçları



Şekil 4.14 test2.raw dosyası için teknik 4' ün sonuçları



Şekil 4.15 test1.raw dosyasından 8 yükseklik aralığı ile teknik 3' ün kullanımıyla elde edilen üç boyutlu model



Şekil 4.16 test2.raw dosyasından 8 yükseklik aralığı ile teknik 3' ün kullanımıyla elde edilen üç boyutlu model

## 5. SONUÇ

Üçgenleştirilmiş Düzensiz Ağ Modeli temelli üçgenleştirme metotları, az sayıda üçgenin olduğu modellerde gerçeğe çok yakın sonuçlar vermektedir. Fakat, bu modelde kompleks hesaplamaların fazla olması işlem zamanı açısından olumsuzluk yaratmaktadır. Ayrıca Üçgenleştirilmiş Düzensiz Ağ Modeli temelli uygulamalar daha fazla disk alanı ve bellek gerektirmektedir. Dijital Yükseklik Modeli temelli üçgenleştirme metotları ise, gerçeğe yakınlık açısından daha az verimli olmasına rağmen, modelleme işlemi için gereken süre açısından daha uygundur. Geliştirilen uygulamalar için disk ve bellek yönetimi daha kolay olmaktadır.

Dijital Yükseklik Modeli temelli dörtlü ağaç algoritmaları, çok-çözünürlüklü üçgenleştirme metotları içinde en etkili olanlardır. Bir düğüm için başka bilgiye gerek kalmaksızın sadece yükseklik ve hata değeri bilgileri saklanmaktadır. Hata değerleri nokta temelli hesaplandığı için, hata değerlerinin üçgen temelli hesaplandığı ikili ağaç yapısından daha basit matematiksel işlemleri içermektedir. Disk ve bellek yönetimi diğer tüm metotlar içinde en uygun olan metottur. Bu nedenle, yürütülen çalışmada Dijital Yükseklik Modeli temelli algoritmalarından dörtlü ağaç algoritması ele alınmıştır.

Tez kapsamında, orijinal dörtlü ağaç algoritması için üç yeni hata hesaplama tekniği ve iki yeni yaklaşım önerilmiştir. Önerilen üç teknik ve orijinal hata hesaplama tekniği, her iki yaklaşımda da kullanılmıştır.

İlk yaklaşımda, modellenecek araziye ait yükseklik bilgilerini içeren dosyadan yükseklik değerleri okutularak arazi boyutlarındaki bir matris yapısında saklanmıştır. Sonraki adımda, yükseklik değerlerinin histogram dizisi üretilip bu diziye göre dört adet yükseklik kümesi oluşturulmuştur. Dört yükseklik kümesinin her birine dört hata hesaplama tekniğinden herbiri uygulanarak toplam  $4^4$  kombinasyona ait sonuçlar kaydedilmiştir. Uygulama sonuçları, elde edilen modelin doğruluğunun, orijinal teknikle elde edilen modelin doğruluğundan daha yüksek olduğunu ve modeldeki üçgen sayısında da düşüş yaşandığını göstermektedir. İlk veri dosyasına ait model doğruluğunda, orijinal tekniğe göre ortalama olarak 19 adet az üçgenle 0,0015 oranında,

ikinci veri dosyasına ait model doğruluğunda ise ortalama olarak 3,5 adet az üçgenle 0,0025 oranında artış gözlemlenmiştir.

İkinci yaklaşımda ise, modelleme esnasında kullanılan çözünürlük parametrelerinin dinamik olarak hesaplanması hedeflenmiştir. Bu amaçla arazi, yükseklik aralıklarına bölünmüştür. Arazi üzerindeki her düğüm için, hata değeri hesaplanırken düğümün denk geldiği yükseklik aralığı bulunarak karşılık gelen çözünürlük parametresi kullanılmıştır. İkinci yaklaşımın uygulama sonuçları da, dinamik çözünürlük parametreleri ile dört tekniğin sabit çözünürlük parametreleri ile kullanımından daha yüksek oranda model doğruluğunu daha az üçgenle verdiğini göstermektedir.

İlk veri dosyasından dinamik çözünürlük parametrelerinin kullanımıyla elde edilen modellerde, sabit çözünürlük parametrelerinin kullanımıyla elde edilen modellere göre; birinci tekniğin ortalama olarak 5816 adet az üçgenle 0,132 oranında daha yüksek, ikinci tekniğin ortalama olarak 3041 adet az üçgenle 0,114 oranında daha yüksek, üçüncü tekniğin ortalama olarak 1841 adet az üçgenle 0,068 oranında daha yüksek ve dördüncü tekniğin 1403 adet az üçgenle 0,114 oranında daha yüksek model doğruluğu sağladığı gözlemlenmiştir.

İkinci veri dosyasından dinamik çözünürlük parametrelerinin kullanımıyla elde edilen modellerde, sabit çözünürlük parametrelerinin kullanımıyla elde edilen modellere göre; birinci tekniğin ortalama olarak 1901 adet az üçgenle 0,082 oranında daha yüksek, ikinci tekniğin ortalama olarak 9682 adet az üçgenle 1,111 oranında daha yüksek, üçüncü tekniğin ortalama olarak 111039 adet az üçgenle 0,204 oranında daha yüksek ve dördüncü tekniğin 19738 adet az üçgenle 1,047 oranında daha yüksek model doğruluğu sağladığı gözlemlenmiştir.

Yukarıda belirtilen uygulama sonuçlarına göre, her iki yaklaşımda da, modellenecek arazinin büyüklüğü arttıkça toplam üçgen sayısındaki azalma ve model doğruluğu oranındaki artış seviyeleri daha da anlam kazanmaktadır. Modelleme zamanı göz önüne alınırsa, çok büyük ölçekli arazilerde önerilen iki yaklaşımdan birini seçmek hız ve bellek kaynakları açısından avantaj sağlayacaktır.

Her iki yaklaşım için de arazinin yükseklik değerlerine göre bölünmesi işleminde küme ve yükseklik aralıklarının sayısı ile başlangıç/bitiş yükseklikleri konularının ayrıca irdelenmesi ve farklı değerlerin modeller üzerinde yarattığı etkilerin analiz edilmesi gerektiği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Yang, B., Shi, W. and Li, Q. 2005. An integrated TIN and Grid method for constructing multi-resolution digital terrain models. *International Journal of Geographical Information Science* Vol. 19, No. 10, pp. 1019–1038.
- Inagaki, K., Okuda, M., Ikehara, M. and Takahashi, S. 2001. Measuring error on 3D meshes using pixel division. *Multimedia Signal Processing, IEEE Fourth Workshop*, pp. 281-286.
- Hilbert, K. and Brunnett, G. 2004. A hybrid LOD based rendering approach for dynamic scenes. *Proceedings of Computer Graphics International*, pp.274-277.
- Xu, K., Zhou, X. and Lin, X. 2004. Direct mesh: a multiresolution approach to terrain visualization. *Proceedings of 20th International Conference on Data Engineering*, pp. 766-776.
- Pajarola, R and DeCoro, C. 2004. Efficient implementation of real-time view-dependent multiresolution meshing. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* Vol. 10, pp. 353-368.
- Wang, L. and Tang, Z. 2000. View-dependent continuous level-of-detail rendering of terrain model. *Proceedings of Computer Graphics and Applications*, pp. 404-405.
- Leal, J., Scheduling, S. and Dissanayake, G. 2006. 3D Terrain Mapping: A Stochastic Approach. *Yayımlanmamış*.
- Hesse, M. and Gavrilova, M. 2003. An Efficient Algorithm for Real-Time 3D Terrain Walkthrough. *International Journal of CAD/CAM* Vol.3, No.2, pp.111-117.
- Carmichael, O., Huber, D. and Hebert, M. 2000. Large Data Sets and Confusing Scenes in 3D surface Matching and Recognition. *Yayımlanmamış*.
- Huber, D. and Hebert, M. 1999. A New Approach to 3-D Terrain Mapping. *Yayımlanmamış*.
- Johnson, A., Carmichael, O., Huber, D. and Hebert, M. 1999. Toward a General 3-D Matching Engine: Multiple Models, Complex Scenes, and Efficient Data Filtering. *Yayımlanmamış*.
- Radoiu, D. and Roman, A. 2000. 3D Terrain Reconstruction Using Scattered Data Sets. *Informatica*, vol.XLV, num.2.
- Gimel'farb, L. and Haralick, M. 1999. Terrain Reconstruction From Multiple Views. *Yayımlanmamış*.



- Pajarola, R. 2002. Overview of Quadtree-based Terrain Triangulation and Visualization. UCI-ICS Technical Report No.02-01.
- Pajarola, R. 1999. Large Scale Terrain Visualization Using The Restricted Quadtree Triangulation. Yayınlanmamış.
- Szenberg, F., Gattass, M. and Carvalho, P. 1999. An Algorithm for the Visualization of a Terrain with Objects. Yayınlanmamış.
- Kersting, O. and Döllner, J. 2002. Interactive 3D Visualization of Vector Data in GIS. Proceedings of the 10th ACM Int.Sym. on Advances in GIS.
- Shiode, N. 2001. 3D Urban Models: recent developments in the digital modeling of urban environments in three-dimensions. *GeoJournal*, vol.52, no.3, pp.263-269.
- Frueh, C. and Zakhor, A. 2001. 3D Model Generation for Cities Using Aerial Photographs and Ground Level Laser Scans. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, vol.2.2.
- Pajarola, R., Antonijuan, M. and Lario, R. 2002. QuadTIN: Quadtree based Triangulated Irregular Networks. In Proceedings IEEE Visualization.
- Frueh, C., Sammon, R. and Zakhor, A. 2004. Automated Texture Mapping of 3D City Models with Oblique Aerial Imagery. 3DPVT 2004 Proceedings.
- van Kaick, O., da Silva, M. and Pedrini, H. 2004. Efficient Generation of Triangle Strips from Triangulated Meshes. *Journal of WSCG*, vol.12, no.1-3.
- Larsen, B. and Christensen, N. 2003. Real-Time Terrain Rendering using Smooth Hardware Optimized Level of Detail. *Journal of WSCG*, vol.11, no.1.
- Falby, J., Zyda, M., Pratt, D. and Mackey, R. 1998. NPSNET: Hierarchical Data Structures for Real-Time Three-Dimensional Visual Simulation. *Computer & Graphics*, vol.17, no.1.
- Lindstrom, P., Koller, D. and Ribarsky, W. 1996. Real-Time, Continuous Level of Detail Rendering of Height Field. Proceedings of ACM Siggraph 96.
- Tzovaras, D. and Strintzis, M. 2001. Hierarchical Representation and Coding of Surfaces Using 3-D Polygon Meshes. *IEEE Transactions on Image Processing*, vol.10, no.8.
- Okuda, M., Nagatomo, K., Ikehara, M. and Takahashi, S. 2004. Similarity detection of 3D meshes using 2D hierarchical regular grids. IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Vol. 1, pp. 145-148.
- Sim, J., Kim, C. and Lee, S. 2002. 3D mesh compression using triangle fan structure. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, vol. 2, pp. 257-

260.

Khan, I.R., Okuda, M. and Takahashi, S. 2004. Regular 3D mesh reconstruction based on cylindrical mapping. IEEE International Conference on Multimedia and Expo, vol. 1, pp. 133-136.

Hussain, M., Okada, Y. and Nijima, K. 2003. A fast and memory-efficient method for LOD modeling of polygonal models. Proceedings of International Conference on Geometric Modeling and Graphics, pp. 137-142.

Tseng, D., Huang, C. and Chen, C. 2001. Dynamic-loading view-dependent multiresolution terrain visualization. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol. 3, pp. 982-984.

Wright R., Sweet M. and Lipchak B 2004. OpenGL SuperBible, Third Edition.

Düzlem Denklemi. Web Sitesi. <http://mathworld.wolfram.com/Plane.html> Erişim Tarihi: 20.01.2006.