

Sapma Açıları ve Belirgin Üçgen Kenarları Kullanılarak Sayısal Yükseklik Modellerinden Düzensiz Üçgen Ağlarının Türetimi

(Derivation of Triangulated Irregular Networks from Digital Elevation Models Using Deviation Angles and Explicit Triangle Edges)

Türkay GÖKGÖZ

Yıldız Teknik Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölümü, İstanbul
gokgoz@yildiz.edu.tr

ÖZ

Coğrafi Bilgi Sistemlerinde Sayısal Yükseklik Modellerinden (DEM) Düzensiz Üçgen Ağlarının (TIN) türetimi çoklu çözünürlük kapsamında ele alınan önemli konulardan biridir. Bu yazıda DEM'lerden TIN'lerin türetimi için yeni bir yöntem tanıtılmaktadır. Bu yöntemde, DEM noktalarının önem dereceleri sapma açıları kullanılarak belirlenmektedir. Belli bir eşik açısına göre belli bir önem derecesine sahip DEM noktaları seçilmektedir. Seçilen DEM noktaları çizgilerle birbirlerine bağlanarak belirgin üçgen kenarları meydana getirilmektedir. DEM sınır noktaları, seçilen noktalar ve belirgin üçgen kenarları kullanılarak zorlanmış Delaunay üçgenleme yöntemine göre sonuç ürün (TIN) elde edilmektedir. Elde edilen TIN'in detay düzeyi Töpfer bağıntısı ile yükseklik hatası ise Koppe bağıntısı ile kontrol edilmektedir. Önerilen yöntem Kenar Kaynaştırma yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Uygulama sonuçlarında önerilen yöntemin lokal yüzey değişimlerine duyarlılık, yapısal ve istatistiksel doğruluk bakımlarından üstünlükleri olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: CBS, Kartografya, Türetim, DEM, TIN.

ABSTRACT

Derivation of Triangulated irregular networks (TINs) from digital elevation models (DEMs) is one of the crucial topics in the context of multiresolution modelling in geographical information systems. This paper introduces a new method for derivation of TINs from DEMs. In this method, significance degrees of DEM points are determined by using deviation angles. In accordance with a certain deviation threshold, a subset of DEM points at a certain significance degree is obtained. Explicit triangle edges are constructed by connecting all the selected DEM points with lines. Resulting TIN is obtained by a constrained Delaunay triangulation using all the DEM boundary points, selected points and explicit triangle edges. Level of detail and vertical error of the resulting TIN are controlled by Töpfer's and Koppe's formulas, respectively. The proposed method is compared to the Edge Contraction method. According to the test results, the proposed method has some advantages such as sensitivity to local surface variations, structural and statistical accuracy.

Keywords: GIS, Cartography, Derivation, DEM, TIN.

1. GİRİŞ

Yeryüzündeki tüm noktaları kaydetmek mümkün olmadığı için arazi yüzeyi yükseklik verilerini toplama işlemi aslında bir örnekleme işlemidir. İki örnekleme yaklaşımı vardır: Sistematik ve uyarlamalı. Sistematik örneklemede, yükseklik noktaları düzenli aralıklarla ölçülmektedir. Sonuç ürün, yükseklik değerlerini içeren bir matristir ve genellikle Sayısal Yükseklik Modeli (DEM: Digital Elevation Model) olarak isimlendirilir. Uyarlamalı örnekleme yaklaşımında, yükseklik ölçüleri, arazi yüzeyinin gösterimi için önemli olduğu kabul edilen noktalarda yapılır. Sonuç ürün, başka amaçlar için kullanılmadan önce yapılandırılması gereken bir dizi düzensiz dağılmış yükseklik değeridir. Bu yaklaşımla toplanan veri üçgenleme yöntemleri ile yapılandırıldığında Düzensiz Üçgen Ağı (TIN: Triangulated Irregular Network) olarak isimlendirilir. TIN model oluşturulurken tepe, çukur, geçit noktaları gibi önemli noktalarla birlikte su toplama ve su dağıtma çizgileri gibi önemli çizgiler de kullanılabilir ve böylece "yapısal doğruluk" sağlanmış olur. TIN modelin yükseklik hatasının belli bir değer altında olması durumunda ise "istatistiksel doğruluk" sağlanmış olur (Fowler ve Little, 1979). TIN yönteminin temelleri günümüzden yaklaşık otuz yıl önce Peucker vd. (1977, 1978) tarafından yapılan çalışmalarla atılmıştır (Polis ve McKeown, 1992).

Coğrafi Bilgi Sistemlerinde hem DEM hem de TIN modeller yaygın olarak kullanılmaktadır. Uygulamalara, teknolojik olanaklara ve diğer birçok faktöre bağlı olarak her bir yöntemin üstün ve zayıf olduğu yanlar vardır. Örneğin, DEM basit fakat genellikle hantal bir veri yapısıdır. TIN modellerden ise topografik bilgi edinmek mümkündür (Peucker ve Douglas, 1975). Eş zamanlı gösterim ve analiz gibi işlemlerde TIN'ler, DEM'lere göre daha etkili modellerdir (Polis ve McKeown, 1992). Örneğin tarıma elverişli arazilerin tespitine yönelik olarak arazi eğimi, bitki örtüsü ve zemin türü verileriyle yapılacak kaplaşım analizi gibi bazı işlemler DEM'lerle daha kolay gerçekleştirilir (Lee, 1991).

Arazi gösterimi ve görüş alanının tespiti gibi çeşitli analizler için TIN'lerin DEM'lerden türetimi gerekli olmaktadır. Ancak bu basit bir işlem değildir. DEM'ler genellikle çok fazla noktadan meydana gelmektedir. Ayrıca bu noktaların önemli bir kısmı gereksiz olabilmektedir. Bu nedenlerle DEM'lerden TIN'ler türetilirken genellikle noktaların tümü değil, bir alt kümesi kullanılır. Bu bağlamda şu soru akla gelmektedir: 'Hangi noktalar seçilmelidir?' veya 'Hangi noktalar ihmal edilebilir?'. Temel prensip "en önemli noktaların seçilmesi" olmalıdır. En önemli noktaların hangileri olduğu sorusunun cevabı, her bir noktanın önem derecesinin nasıl belirleneceğine bağlıdır. Burada, bir noktanın önem derecesi ile kastedilen, o noktanın yüzey gösterimine katkısıdır. Bir noktanın yüzey gösterimine katkısı ne kadar fazla ise önem derecesi de o kadar fazladır (Chen ve Guevara, 1987).

DEM'lerden TIN'lerin türetilmesi konusunda yapılan ilk çalışmaların esin kaynağı, Douglas ve Peucker (1973) tarafından çizgi basitleştirme konusunda yapılan çalışma olmuştur. Konuya katkı sağlayan diğer başlıca çalışmalar kronolojik olarak şöyle özetlenebilir. Peucker ve Douglas (1975), önemli noktaların ve çizgilerin DEM'den türetilen topolojik bilgilere dayalı olarak belirlendiği bir sistem geliştirmiştir. Fowler ve Little (1979), önemli DEM noktalarının görüntü işlemede kenar türetme amaçlı kullanılan operatörlere benzer bir geometrik operatör ile belirlendiği, TIN modelin Delaunay üçgenleme yöntemiyle ve tüm önemli DEM noktalarına ilaveten DEM sınır noktaları da kullanılarak elde edildiği bir yöntem geliştirmiştir. Yoeli (1984), önemli DEM noktalarının profiller boyunca geçirilen spline türünde eğriler yardımıyla belirlendiği bir yöntem önermiştir. Chen ve Guevara (1987), her bir DEM noktasının önem derecesinin bir mekânsal yüksek geçiş filtresi yardımıyla belirlendiği ve kısaca VIP (Very Important Points) ismiyle bilinen yöntemi geliştirmiştir. Lee (1989), bir DEM noktasının özgün yüksekliği ile o DEM noktası atılarak geriye kalan DEM noktaları ile elde edilen TIN'de hesaplanan yüksekliği arasındaki farka bakılarak o noktanın önemli veya önemsiz olduğuna karar verildiği bir yöntem önermiştir. Weibel (1992), önemli DEM noktalarının belirlenmesi için iki filtre yöntemi (global filtreleme yöntemi ve tekrarlamalı filtre yöntemi) önermiştir. Polis ve McKeown (1992), DEM köşe noktalarından türetilmiş bir başlangıç TIN'den hareketle, her defasında maksimum hatalı kısmına DEM'den seçilen bir noktanın ilave edilmesi yoluyla uygun bir TIN'e ulaşılması esasına dayalı bir teknik tarif etmiştir.

Bjørke ve Midtbø (1993) tarafından önerilen yöntemde bir noktanın önemli olup olmadığına, o nokta ile o noktanın sınırları içinde kaldığı üçgen yüzey arasındaki mesafeye bakılarak karar verilmektedir. Mesafe ne kadar uzun ise nokta o kadar önemli kabul edilmektedir. Kumler (1994), ArcInfo'da LATTICETIN olarak bilinen yöntemi tanıtmıştır. Bu yöntem üç boyutlu Douglas-Peucker (1973) çizgi basitleştirme algoritması gibi düşünülebilir. Takahashi ve ark. (1995), düzgün yüzeylerin topolojik değişmezini temsil eden Euler formülüne dayalı olarak önemli noktaların belirlendiği bir yöntem önermiştir. Andrews (1996), noktaların üç ölçüte (üçgenleme hiyerarşisinin derecesi, hacim farkı ve üçgenlerin normal vektörleri) göre elendiği ve böylece önemli noktaların seçildiği yöntemler tarif etmiştir. Pedrini (2001) tarafından önerilen yöntemde, bir DEM noktasının önemli olup olmadığı, o noktanın komşu noktalarına göre hesaplanmış standart sapma ile ağırlıklandırılmış maksimum yükseklik hatasına bakılarak karar verilmektedir. Wang ve ark. (2001), hem önemli DEM noktalarının belirlenmesinde hem de üçgenlemede farklı yöntemlerin kullanılmasıyla elde edilen TIN'leri karşılaştırmıştır. Bjørke ve Nilsen (2003) tarafından tanıtılmış olan yöntemde, önemli DEM noktaları, dalgacık (wavelet) katsayılarına dayalı olarak belirlenmektedir. Little ve Shi (2003), önemli olarak belirlenen DEM noktalarının sıralanmasında kullanılabilecek çeşitli ölçüler (normal hacim, mutlak normal toplam, normal toplam, mutlak düşey toplam, düşey toplam, düşey hacim, karesel normal toplam, karesel düşey toplam ve işaretli karesel düşey toplam) önermiştir. Gökgöz (2010), drenaj çizgileri gibi ilave bilgi olmaksızın yalnız DEM noktalarını kullanarak yüksek doğruluklu Düzenli Üçgen Ağı (TRN: Triangulated Regular Network) elde edilmesine yönelik geliştirdiği yöntemde eğitim bilgisine dayalı olarak önemli DEM noktalarını ve bu noktalar arasındaki komşuluk ilişkisini belirlemiştir. Zhou ve Chen (2011), DEM'den türetilecek TIN'in drenaj çizgileri ile uyumlu olması amacı doğrultusunda, maksimum z-tolerans ve D8 (Deterministic eight node) algoritmalarının kullanıldığı bir yöntem önermiştir. Bu yöntem, Chen ve Zhou (2013) tarafından, önemli nokta seçme işlemi ile bir ölçek değişkeni ilişkilendirilerek iyileştirilmiştir. Hou vd. (2013) önemli DEM noktalarının jeodezik mesafelere dayalı olarak belirlendiği bir yöntem önermiştir. Chen ve Li (2013), DEM noktalarının önem derecelerinin OLS (Orthogonal Least Square) yöntemiyle belirlendiği bir yöntem geliştirmiştir.

Bu çalışmada, DEM'lerden TIN'lerin türetimi için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemin

yukarıda bahsedilen yöntemlerden başlıca farkları şunlardır:

(1) Önemli DEM noktalarının belirlenmesinde yeni bir ölçü olarak sapma açılarının kullanılması,

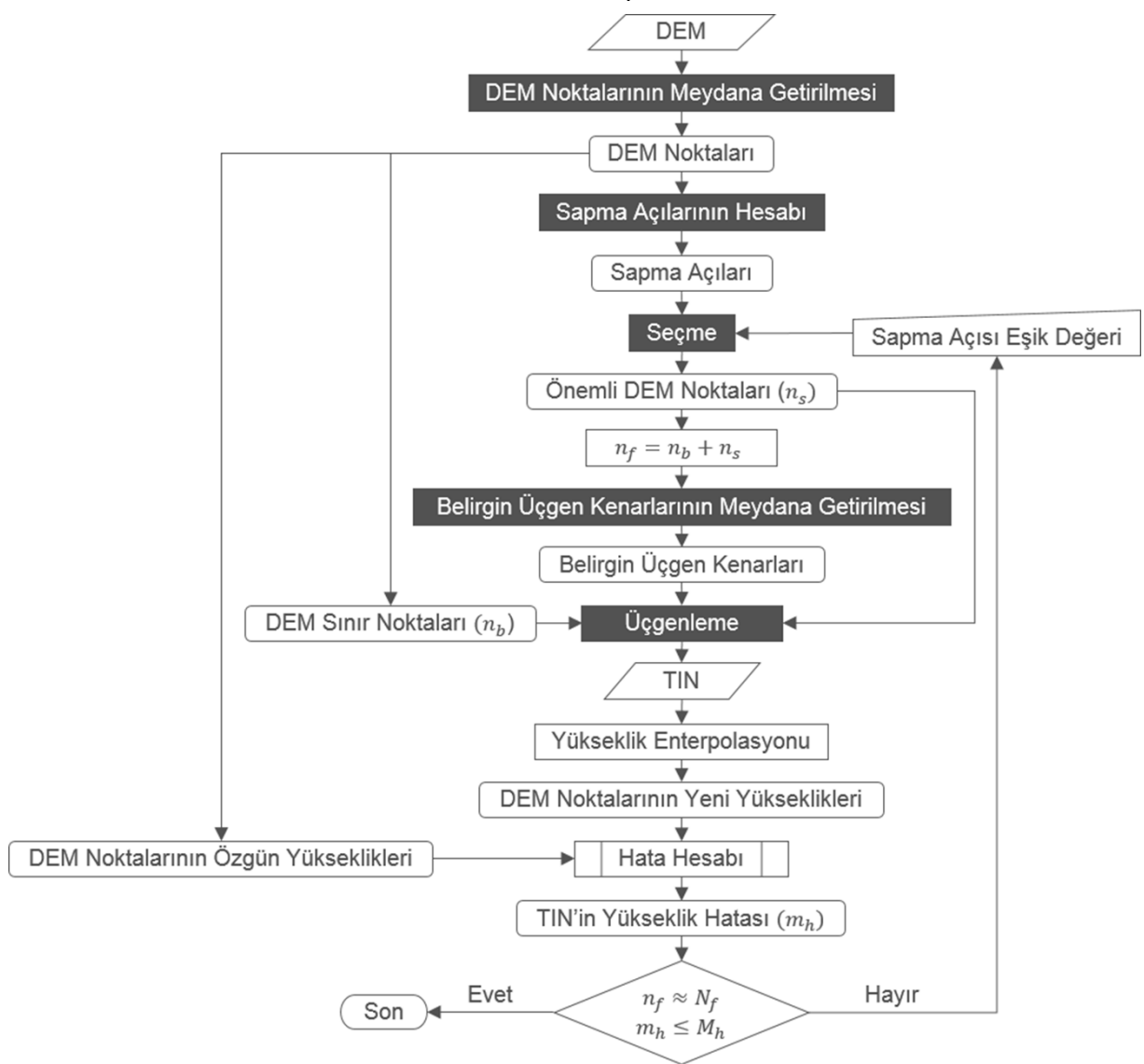
(2) Önemli DEM noktalarından komşu olanların çizgilerle birleştirilmesi (belirgin üçgen kenarları) ve bu çizgilerin üçgenlemede zorlama kenarları olarak kullanılması,

(3) Elde edilen TIN'in detay düzeyinin Töpfer bağıntısı ile yükseklik hatasının ise Koppe bağıntısı ile kontrol edilmesidir. Hem yapısal hem de istatistiksel doğru modellerin elde edilmesi ise bu çalışmanın esas amacı olarak ifade edilebilir.

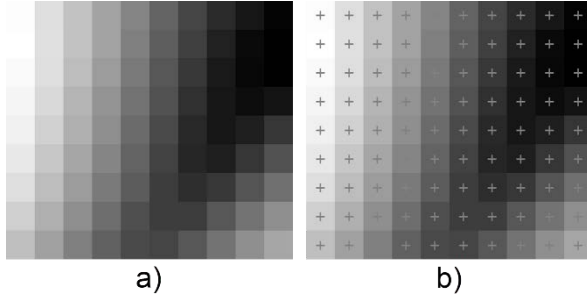
2. ÖNERİLEN YÖNTEM

Önerilen yöntemde her biri aşağıda açıklanan başlıca beş işlem gerçekleştirilmektedir. Önerilen yöntemin akış diyagramı Şekil 1'de görülmektedir.

DEM noktalarının meydana getirilmesi: Raster formatlı DEM pikselleri, vektör formatlı yükseklik noktalarına dönüştürülür. Böylece, DEM'i meydana getiren her bir pikselin merkezinde nokta türünde yüksekliği bilinen bir geometrik nesne meydana gelir (Şekil 2). Piksel değerleri DEM noktalarına yükseklik değerleri olarak atanır.

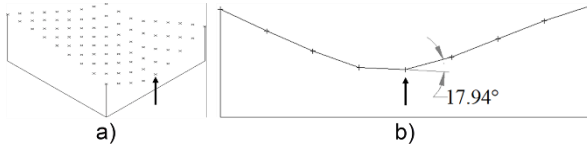


Şekil 1. Önerilen yöntemin akış diyagramı. N_f Töpfer'in bağıntısı ile hesaplanan nokta sayısı ve M_h Koppe'nin bağıntısı ile hesaplanan yükseklik hatası eşik değeri.

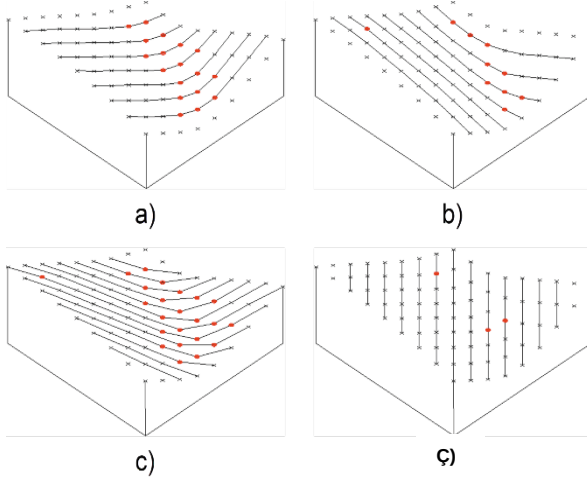


Şekil 2. Bir örnek DEM (a) ve her bir pikselin merkezine konumlandırılan DEM noktaları (b).

Sapma açılarının hesabı: Bir profil boyunca ardışık üç noktayı birleştiren iki çizgi olduğunu varsayalım. Sapma açısı, orta noktada ölçülen, birinci çizginin uzantısı ile ikinci çizgi arasındaki açıdır (Şekil 3). Bir DEM noktasında dört profil boyunca (batı-doğu, güney-kuzey, güneybatı-kuzeydoğu, güneydoğu-kuzeybatı) dört sapma açısı hesaplanır (Şekil 4).



Şekil 3. DEM noktaları (a) ve bir profil boyunca bir DEM noktasındaki sapma açısı (b).

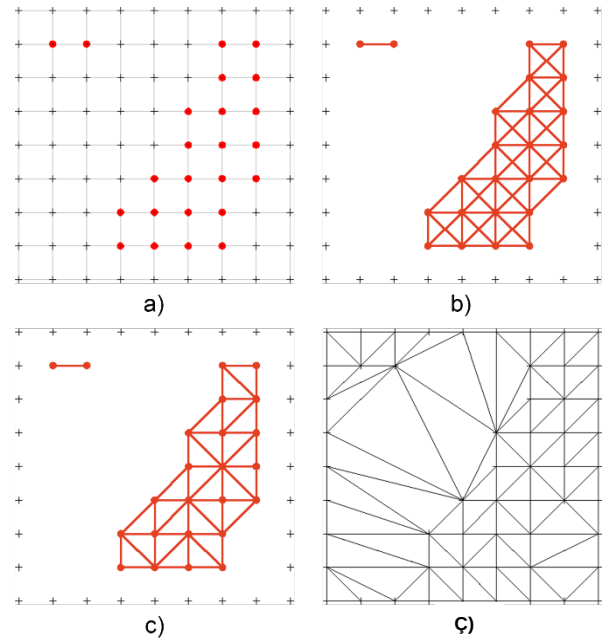


Şekil 4. Batı-doğu (a), güney-kuzey (b), güneydoğu-kuzeybatı (c) ve güneybatı-kuzeydoğu (d) profilleri boyunca önemli DEM noktaları (kırmızı daireler).

Seçme: DEM noktaları önem derecelerine göre seçilir. Bir DEM noktasının önem derecesi, o noktada hesaplanan sapma açılarının kullanıcı tarafından belirlenen bir eşik değeriyle karşılaştırılmasıyla belirlenir. Eğer bir DEM

noktasında hesaplanan sapma açılarından en az biri eşik değerden büyükse, o DEM noktası "önemli" olarak kabul edilir ve böylece seçilir.

Belirgin üçgen kenarlarının önceden meydana getirilmesi ve üçgenleme: Her bir önemli DEM noktasının etrafında başka önemli DEM noktaları (komşuları) olup olmadığı araştırılır. Batı-doğu ve güney-kuzey doğrultuları boyunca tüm DEM noktalarının çizgilerle birleştirildiğini ve böylece bir grid oluşturulduğunu varsayalım. Bir önemli DEM noktasının komşuları, o noktanın etrafındaki dört grid hücrelerinin köşe noktalarında aranır (Şekil 5a). Eğer varsa, her biri bir çizgiyle o önemli DEM noktasına bağlanır. Bu işlem her bir önemli DEM noktasında tekrarlandığında, bir dizi çizgi ortaya çıkar (Şekil 5b). Bu çizgiler önemli DEM noktalarını birleştiren çizgiler olduğu için "önemli çizgiler" olarak kabul edilebilir.



Şekil 5. Önemli noktalar (kırmızı daireler) ve grid (gri çizgiler) (a), önemli noktalar (kırmızı daireler) ve önemli noktaları bağlayan çizgiler (kırmızı çizgiler) (b), önemli noktalar (kırmızı daireler) ve belirgin üçgen kenarları (kırmızı çizgiler) (c) ve sonuç ürün TIN (ç).

Bu kabule dayalı olarak bir topolojik bilgi (önemli DEM noktaları arasındaki komşuluk ilişkisi) ilk defa bu yöntemde DEM'lerden TIN'lerin türetilmesi amacı doğrultusunda kullanılmıştır. Bu şekilde türetilen çizgiler üçgenlemede "kısıtlayıcı çizgiler" olarak kullanılmakta ve böylece sonuç ürün TIN'de birer üçgen kenarı olmaktadır. Bu nedenle bu çizgiler "belirgin üçgen kenarları" olarak isimlendirilmiştir. Ancak, bu halde çizgilerin

tamamı belirgin üçgen kenarı niteliğinde olmayabilir. Şu durumun araştırılması gerekmektedir: Eğer bir grid hücrenin dört köşe noktası da birer önemli DEM noktası ise, grid hücrenin dört köşe noktası da birbirine bağlanır ve böylece kesişen iki çizgi (grid hücrenin köşegenleri) ortaya çıkar. Kesişen bu iki çizginin ikisinin de üçgenlemede birer kısıtlayıcı çizgi olarak kullanılması ve dolayısıyla sonuç ürün TIN'de birer üçgen kenarı olması mümkün olmadığından, ikisinden birinin silinmesi gerekmektedir. Bu durumda hangisinin silineceğine karar verilmelidir. Bu amaçla kullanılabilecek en iyi ölçüt eğim bilgisidir. Çünkü bir TIN'i meydana getiren üçgen kenarları – bilinen diğer işlevlerinin yanı sıra– yükseklik eğrilerinin türetilmesi gibi çeşitli analizlerde enterpolasyon doğrultularını gösterir ve bir enterpolasyon işleminin daima alternatifler arasında eğimi daha fazla olan doğrultuda yapılması tercih edilir. Bu bağlamda, kesişen iki çizgiden eğimi daha az olan silinir ve böylece nicelik ve nitelik bakımından daha doğru “belirgin üçgen kenarları” elde edilmiş olur (Şekil 5c). Önemli DEM noktaları ve belirgin üçgen kenarları ile birlikte DEM sınır noktaları da kullanılarak “zorlanmış Delaunay üçgenleme” yöntemine göre sonuç ürün TIN elde edilir (Şekil 5ç) (Gökgöz, 2010). Arazinin bütünü temsil eden (sınırlar boyunca girinti şeklinde boşlukların olmadığı) bir model elde etmek için genellikle DEM sınır noktaları üçgenlemede doğrudan kullanılmaktadır. Arazinin bütünü temsil eden bir modele ihtiyaç olmadığı durumlarda DEM sınır noktaları kullanılmayabilir. Her iki durumda da TIN –kapladığı yüzeyi– başarıyla temsil eder.

Analiz: Yukarıdaki aşamalardan sonra elde edilen TIN'in öncelikle “istatistiksel doğruluk analizi” yapılır. Mevcut yöntemlerde “istatistiksel doğruluk analizi” için –genellikle– elde edilen TIN'in yükseklik hatası bir ölçü olarak kullanılmakta ve karar kullanıcıya bırakılmaktadır. Önerilen yöntemde ise “istatistiksel doğruluk analizi” için bir ölçü olarak yine elde edilen TIN'in yükseklik hatası hesaplanmakla birlikte –mevcut yöntemlerden farklı olarak– karar aşamasında bir eşik değerden yararlanılmaktadır. Bu eşik değer Koppe'nin aşağıdaki bağıntısı ile hesaplanmaktadır (Imhof, 1965).

$$M_h = \pm(A + B \tan \alpha) \quad (1)$$

M_h yükseklik hatası eşik değeri, $\tan \alpha$ arazinin ortalama eğimi, A ve B ise belli topografik harita serileri için ampirik olarak belirlenmiş sabit değerlerdir. Çeşitli ölçekler için

A ve B değerleri (Imhof, 1965) Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Çeşitli ölçekler için Koppe bağıntısı (Imhof, 1965).

Ölçek	M_h [m]
1:1,000	$\pm (0.1 + 0.3 \tan \alpha)$
1:5,000	$\pm (0.4 + 3 \tan \alpha)$
1:10,000	$\pm (1 + 5 \tan \alpha)$
1:25,000	$\pm (1 + 7 \tan \alpha)$
1:50,000	$\pm (1.5 + 10 \tan \alpha)$

Elde edilen TIN'in yükseklik hatası (m_h) ise aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$m_h = \sqrt{([dh \times dh]/n_d)} \quad (2)$$

dh bir DEM noktasının özgün yüksekliği ile o noktanın TIN'den hesaplanan yüksekliği (içinde yer aldığı üçgenin köşe noktalarının yüksekliklerinden lineer enterpolasyon yoluyla belirlenen değer) arasındaki fark ve n_d toplam DEM noktası sayısıdır.

Bir TIN'in detay düzeyi öncelikle nokta sayısına bağlıdır. Mevcut yöntemlerden bazılarında nokta sayısı, değeri kullanıcı tarafından belirlenen bir parametredir. Nokta sayısı ve dolayısıyla TIN'in detay düzeyi doğrudan kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir. Ancak mevcut yöntemlerin hiçbirinde nokta sayısı için bir eşik değer belirlemeye yönelik bir ölçüt yoktur. Önerilen yöntemde ise nokta sayısı için bir eşik değer belirlemek amacıyla Töpfer'in aşağıdaki bağıntısı kullanılmaktadır.

$$N_f = N_a \sqrt{(M_a/M_f)} \quad (3)$$

N_f hedef ölçekteki nokta sayısı, N_a kaynak ölçekteki nokta sayısı, M_a kaynak ölçek sayısı ve M_f hedef ölçek sayısıdır (Töpfer ve Pillewizer, 1966).

Sonuç olarak, önerilen yöntemde TIN'in yükseklik hatasının Koppe'nin bağıntısı ile hesaplan değerden küçük olması ve nokta sayısının Töpfer'in bağıntısı ile hesaplanan değere yakın olması hedeflenmektedir. Bu hedefler kısaca şöyle formülize edilebilir: $m_h \leq M_h$ ve $n_f \approx N_f$. Burada, n_f üçgenlemede kullanılan toplam nokta sayısıdır ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

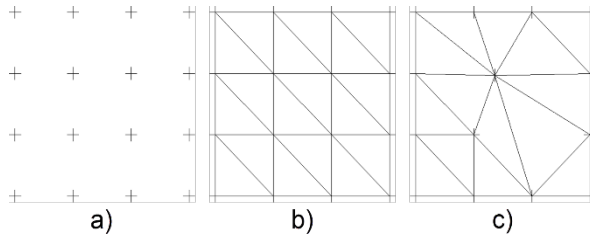
$$n_f = n_b + n_s \quad (4)$$

n_b DEM sınır noktaları sayısı ve n_s seçilen önemli DEM noktaları sayısıdır.

Bu hedeflere ulaşmanın aracı ise sapma açısı için kullanıcı tarafından belirlenen eşik değerdir. Kullanıcı bu hedeflere ulaşmaya kadar her defasında sapma açısı eşik değerini artırarak ya da azaltarak yukarıdaki yöntemi tekrarlar.

3. UYGULAMA

Önerilen yöntemi, yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olan Kenar Kaynaştırma (Edge Contraction) yöntemi ile karşılaştırarak nicelik ve nitelik açıdan değerlendirmeler yapabilmek için bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Kenar Kaynaştırma yönteminde mevcut bir TIN'deki üçgen kenarları ele alınır. Bir kenarın iki uç noktası yerine yeni bir nokta belirlenir. Böylece her adımda bir nokta elenmiş olur. Yeni noktanın konumunu belirlemedeki ölçüt, yeni yüzeydeki değişiklik miktarıdır. Yüzeydeki değişiklik minimum olacak şekilde yeni noktanın konumu belirlenir. Elenecek nokta yüzdesi kullanıcı tarafından belirlenir. Sınır noktaları elenmez (Holland ve Mercier, 2012). Kenar Kaynaştırma yönteminin girdi ve çıktısı Şekil 6'da küçük bir örnek üzerinde gösterilmiştir. Bu küçük örnekte sonuç ürün TIN, elenecek nokta yüzdesi olarak 50 (%50) değeri girilerek elde edilmiştir. Yöntem AutoCAD Civil 3D 2013'ün yerleşik bir aracı ile uygulanmıştır.



Şekil 6. DEM noktaları (a), başlangıç TIN (b) ve Kenar Kaynaştırma yönteminin sonuç ürünü TIN (c).

Bu uygulamada Şekil 7'de görünen DEM kullanılmıştır. Bu DEM 10 metre çözünürlüklü olup, 1681 noktadan (41 satır, 41 sütun) meydana gelmektedir. 1:5,000 ölçekli standart topoğrafik harita verilerinden türetilmiştir. Yapılan çalışmalarda, birçok analiz için 30 ve 90 metre çözünürlüklü DEM'lerin yetersiz olduğu, 2 ve 4 metre çözünürlüklü DEM'lerin gereksiz olduğu, 10 metre çözünürlüklü DEM'lerin ise ideal olduğu tespit edilmiştir (Hengl, 2006). Bu nedenle, DEM çözünürlüğü olarak 10 metre tercih edilmiştir. Çalışma bölgesinde ortalama eğim %37.41 veya $\alpha=20.51$ derecedir.



Şekil 7. Uygulamada kullanılan DEM.

Amaç, 1:25,000 (25K) ve 1:50,000 (50K) ölçekleri için yeterli doğrulukta TIN'lerin türetilmesidir. Her iki yöntem de yukarıda açıklanan hedefler ($m_h \leq M_h$ ve $n_f \approx N_f$) doğrultusunda uygulanmıştır. Önerilen yöntemin uygulanmasında AutoLISP programlama dilinde yazılan bir dizi program kullanılmıştır. Töpfer'in bağıntısı ile hesaplanan nokta sayısı (N_f) değerleri ve Koppe'nin bağıntısı ile hesaplanan yükseklik hatası (M_h) değerleri Tablo 2 ve 3'te verilmiştir.

Tablo 2. Töpfer'in bağıntısı ile hesaplanan nokta sayısı (N_f) değerleri

Ölçek	N_f
1:25,000	$1681 \times \sqrt{(5000/25000)} = 751$
1:50,000	$1681 \times \sqrt{(5000/50000)} = 531$

Tablo 3. Koppe'nin bağıntısı ile hesaplanan yükseklik hatası (M_h) değerleri

Ölçek	M_h [m]
1:25,000	$\pm (1 + 7 \tan 20.51^\circ) = 3.61$
1:50,000	$\pm (1.5 + 10 \tan 20.51^\circ) = 5.24$

Her iki yöntemin de kullanıcı tanımlı birer parametresi vardır: Önerilen yöntemde sapma açısı eşik değeri ve Kenar Kaynaştırma yönteminde elenecek nokta yüzdesi. Bu parametrelere başlangıçta sırasıyla 1° ve %1 değerleri atanarak ve her defasında bu değerler 1° ve %1 artırılarak her iki yöntem de birçok kez uygulanmış ve bir dizi sonuç elde edilmiştir.

Tablo 2 ve 3'te görüldüğü gibi 25K ölçeği için Töpfer'in bağıntısıyla hesaplanan nokta sayısı $N_{f_{25K}} = 751$ ve Koppe'nin bağıntısıyla hesaplanan yükseklik hatası $M_{h_{25K}} = 3.61$ metredir. Tablo 4'te görüldüğü gibi, önerilen yöntem ile parametre değeri olarak 7° ve 8° atanarak elde edilen iki TIN'in nokta sayıları (n_f) sırasıyla $n_{f_7} = 783$ ve $n_{f_8} = 696$, yükseklik hataları (m_h) ise sırasıyla $m_{h_7} = 0.94$ metre ve $m_{h_8} = 0.97$ metredir.

Tablo 4. Önerilen yöntem ile dört sapma açısı eşik değeri atanarak elde edilmiş dört TIN'in nokta sayıları (n_f) ve yükseklik hataları (m_h)

Sapma açısı [$^\circ$]	n_f	m_h [m]
7	783	0.94
8	696	0.97
10	569	1.63
11	525	1.78

Analiz 1: $n_{f_7} \approx N_{f_{25K}}$ ve $m_{h_7} < M_{h_{25K}}$

Karar 1: Önerilen yöntem ile parametre değeri olarak 7° atanarak elde edilen TIN, 25K ölçeği için sonuç ürün kabul edilebilir.

Tablo 2 ve 3'te görüldüğü gibi 50K ölçeği için Töpfer'in bağıntısıyla hesaplanan nokta sayısı $N_{f_{50K}} = 531$ ve Koppe'nin bağıntısıyla hesaplanan yükseklik hatası $M_{h_{50K}} = 5.24$ metredir. Tablo 4'te görüldüğü gibi, önerilen yöntem ile parametre değeri olarak 10° ve 11° atanarak elde edilen iki TIN'in nokta sayıları (n_f) sırasıyla $n_{f_{10}} = 569$ ve $n_{f_{11}} = 525$, yükseklik hataları (m_h) ise sırasıyla $m_{h_{10}} = 1.63$ metre ve $m_{h_{11}} = 1.78$ metredir.

Analiz 2: $n_{f_{11}} \approx N_{f_{50K}}$ ve $m_{h_{11}} < M_{h_{50K}}$

Karar 2: Önerilen yöntem ile parametre değeri olarak 11° atanarak elde edilen TIN, 50K ölçeği için sonuç ürün kabul edilebilir.

Tablo 5'te görüldüğü gibi, Kenar Kaynaştırma yöntem ile parametre değeri olarak $\%61$ ve $\%62$ atanarak elde edilen iki TIN'in nokta sayıları (n_f) sırasıyla $n_{f_{61}} = 754$ ve $n_{f_{62}} = 738$, yükseklik hataları (m_h) ise sırasıyla $m_{h_{61}} = 0.12$ metre ve $m_{h_{62}} = 0.12$ metredir.

Tablo 5. Kenar Kaynaştırma yöntemi ile dört sapma açısı eşik değeri atanarak elde edilmiş dört TIN'in nokta sayıları (n_f) ve yükseklik hataları (m_h)

Elenecek nokta yüzdesi [%]	n_f	m_h [m]
61	754	0.12
62	738	0.12
75	541	0.18
76	526	0.19

Analiz 3: $n_{f_{61}} \approx N_{f_{25K}}$ ve $m_{h_{11}} < M_{h_{25K}}$

Karar 3: Kenar Kaynaştırma yöntemi ile parametre değeri olarak $\%61$ atanarak elde edilen TIN, 25K ölçeği için sonuç ürün kabul edilebilir.

Tablo 5'te görüldüğü gibi, Kenar Kaynaştırma yöntemiyle parametre değeri olarak $\%75$ ve $\%76$ atanarak elde edilen iki TIN'in nokta sayıları (n_f) sırasıyla $n_{f_{75}} = 541$ ve $n_{f_{76}} = 526$, yükseklik hataları (m_h) ise sırasıyla $m_{h_{75}} = 0.18$ metre ve $m_{h_{76}} = 0.19$ metredir.

Analiz 4: $n_{f_{76}} \approx N_{f_{50K}}$ ve $m_{h_{76}} < M_{h_{50K}}$

Karar 4: Kenar Kaynaştırma yöntemi ile parametre değeri olarak $\%76$ atanarak elde edilen TIN, 50K ölçeği için sonuç ürün kabul edilebilir.

25K ve 50K ölçekleri için sonuç ürünler olmasına karar verilen TIN'lerin görsel karşılaştırılması için TIN noktaları, TIN üçgenleri ve TIN'lerden türetilmiş yükseklik eğrileri sırasıyla Şekil 8 ve 9'da verilmiştir. Şekil 8a ve Şekil 9a'da görüldüğü gibi, önerilen yöntem noktaların konumlarını değiştirmezken, Kenar Kaynaştırma yöntemi farklı konumda yeni noktalar türetmiştir. Ayrıca, Kenar Kaynaştırma yöntemi ile elde edilen noktaların bir kısmı arazinin yamaçlar gibi daha az karakteristik kısımlarında yer almıştır. Bununla birlikte, önerilen yöntem ile elde edilen noktaların hemen tamamı arazinin sırt ve vadi gibi en karakteristik kısımlarında yer almıştır. Önerilen yöntem ile elde edilen noktalara bakarak arazi iskeleti kolaylıkla gözde canlandırılabilen ancak Kenar Kaynaştırma yöntemiyle elde edilen noktalara bunu yapmak çok daha güçtür. Şekil 8b ve 9b'de görünen TIN'ler ve Şekil 8c ve 9c'de görünen yükseklik eğrileri de bu tespitleri doğrulamaktadır.

4. SONUÇLAR

Sapma açısı genel olarak lokal yüzey değişimlerini belirlemede kullanılan bir ölçüdür. Önerilen yöntemde ise noktaların önem derecelerini belirlemede kullanılmıştır. Bu nedenle, önerilen yöntemin lokay yüzey değişimlerine duyarlı olduğu söylenebilir. Sapma açısının bu amaç doğrultusunda kullanıldığı başka bir yöntem yoktur.

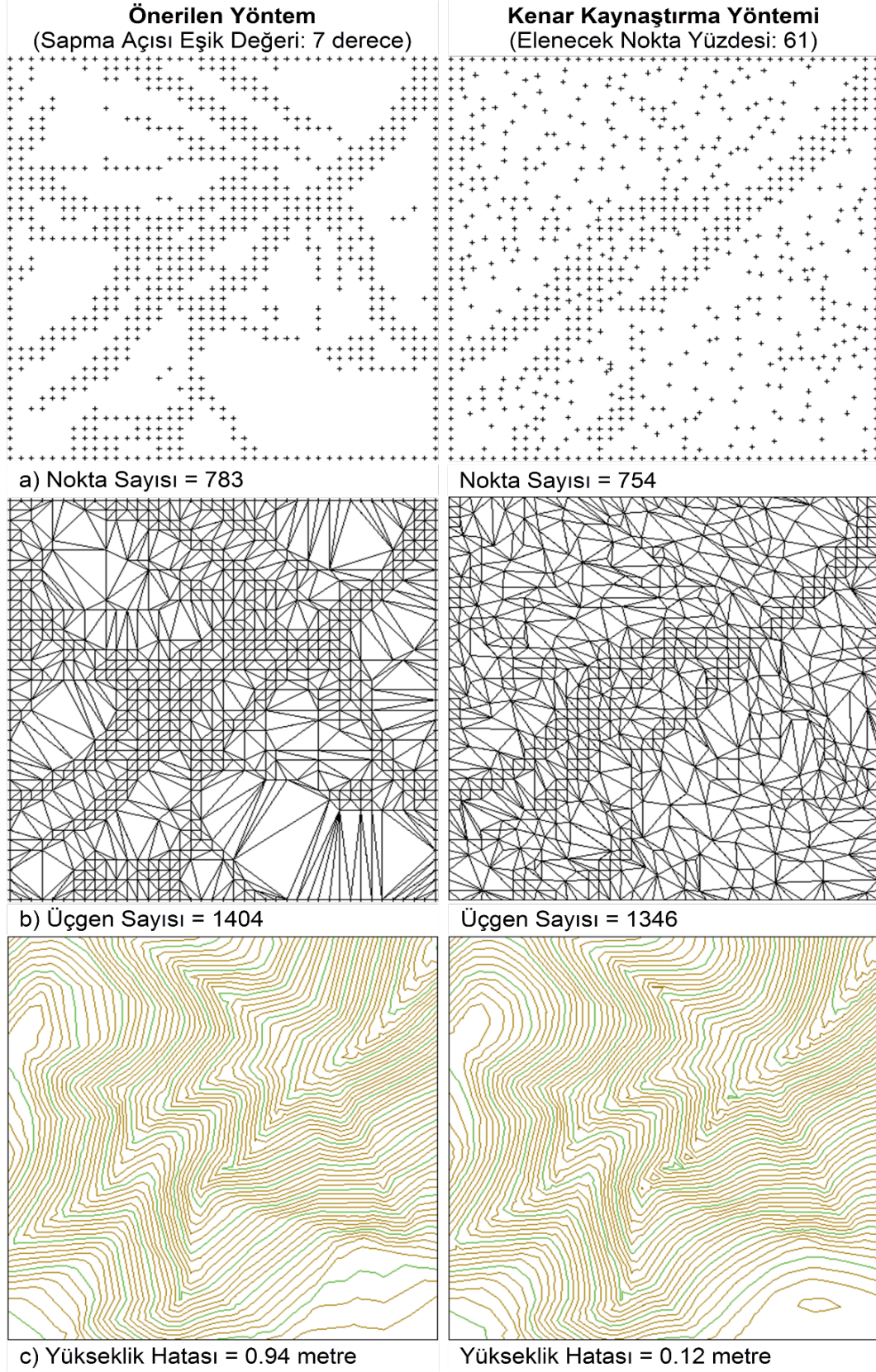
Kullanıcı, önerilen yöntemin parametresi (sapma açısı eşik değeri) sayesinde, tüm DEM noktaları arasından seçilerek TIN'e dâhil edilecek olan noktaların önem derecesini doğrudan belirleyebilmektedir. Oysa Kenar Kaynaştırma yöntemi gibi birçok yöntemde bu mümkün olmamaktadır. Bu bağlamda, önerilen yöntemin nitelik öncelikli bir yöntem olduğu söylenebilir.

Önerilen yöntemle seçilen noktalar daha çok sırt, vadi gibi arazinin en karakteristik kısımlarında yer almaktadır ve arazinin iskeletini gözler önüne sermektedir. Bu bağlamda, önerilen yöntemin önemli DEM noktalarını seçtiği ve bu nedenle yapısal doğru modeller ortaya koyduğu söylenebilir. Töpfer'in nokta sayısına ilişkin bağıntısı ve Koppe'nin ortalama yükseklik

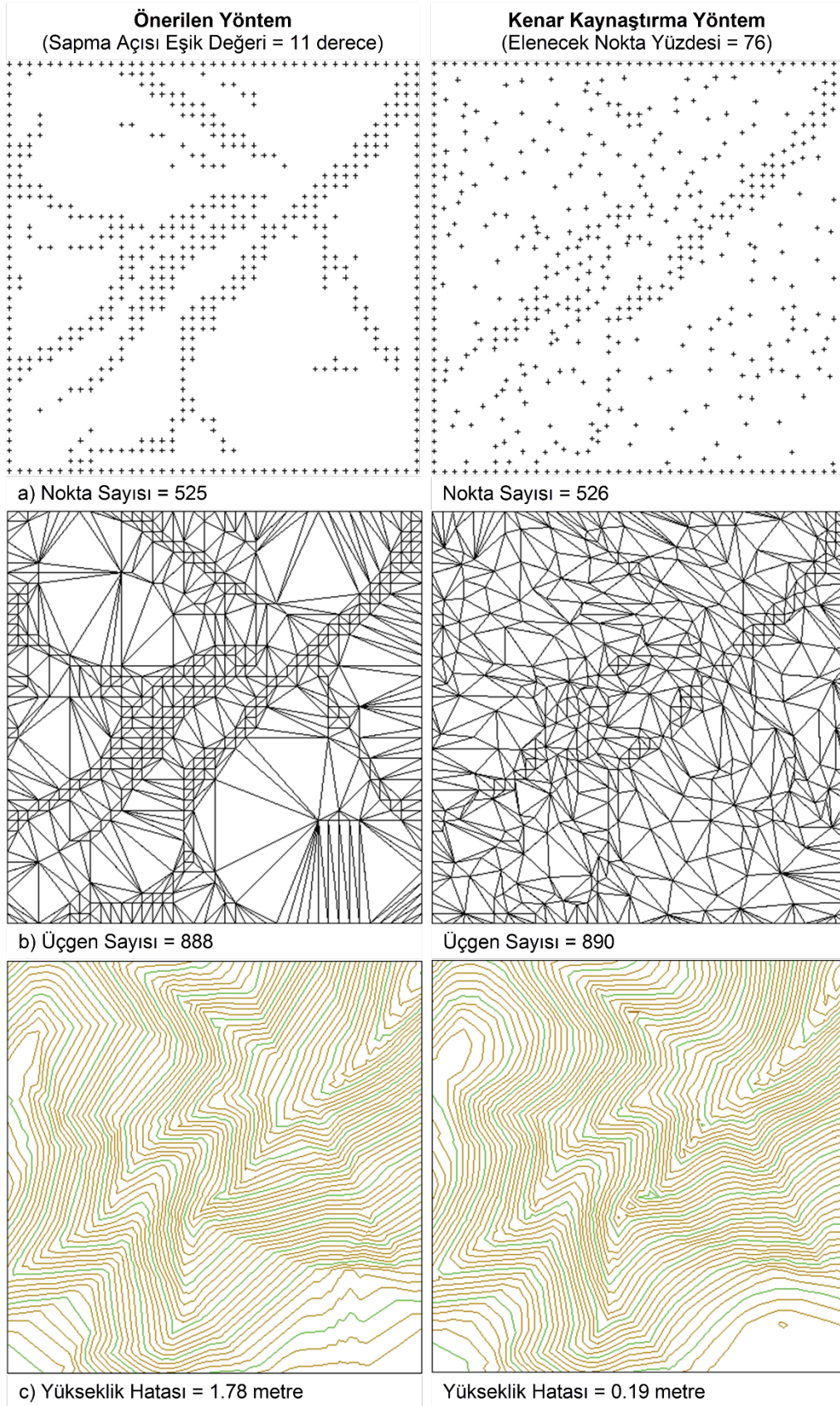
hatasına ilişkin bağıntısı haritacılıkta iyi bilinmekte ve çeşitli amaçlar doğrultusunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Önerilen yöntemde ise Töpfer'in bağıntısıyla hesaplanan değer bir hedef, Koppe'nin bağıntısıyla hesaplanan değer bir eşik değer olarak kullanılmaktadır. Bu bağlamda, önerilen yöntemle elde edilen TIN modellerin detay düzeylerinin rastlantısal ya da keyfi olmadığı ve istatistiksel doğru modeller olduğu söylenebilir.

Önerilen yöntemin parametresi başlangıçta ve her iterasyonda otomatik olarak belirlenebilir (örneğin, bu çalışmada olduğu gibi 1° ile başlanabilir ve her iterasyonda 1° artırılabilir) ve böylece tam otomatik hale getirilebilir. Ancak, kullanıcıların farklı detay düzeyinde TIN'lere ihtiyaç duyabilecekleri düşüncesiyle yarı otomatik olması tercih edilmiştir.

Koppe bağıntısındaki ampirik değerler 1:1,000, 1:5,000, 1:10,000, 1:25,000 ve 1:50,000 ölçekleri için belirlenmiştir. Bu bağlamda, önerilen yöntem bu ölçekler haricinde bir ölçek için kullanılamaz. Yükseklik doğruluğu bakımından eşik değer olarak diğer ölçekler için ne kullanılabileceği ayrı bir araştırma konusudur.



Şekil 8. 25K ölçeği için önerilen yöntem (sol taraf) ve Kenar Kaynaştırma yöntemi (sağ taraf) ile üretilen TIN'lerdeki noktalar (a), üçgenler (b) ve TIN'lerden türetilen yükseklik eğrileri (c).



Şekil 9. 50K ölçeği için önerilen yöntem (sol taraf) ve Kenar Kaynaştırma yöntemi (sağ taraf) ile üretilen TIN'lerdeki noktalar (a), üçgenler (b) ve TIN'lerden türetilen yükseklik eğrileri (c)

KAYNAKLAR

- Andrews, D.S., 1996. **Simplifying Terrain Models and Measuring Terrain Model Accuracy**, University of British Columbia, Canada.
- Bjørke, J.T., Midtbø, T., 1993. **Generalization of Digital Surface Models**, in Proceedings of the 16th International Cartographic Conference, Cologne, Germany, May 3–9.
- Bjørke, J.T., Nilsen, S., 2003. **Wavelets Applied to Simplification of Digital Terrain Models**, Int. J. Geogr. Inf. Sci., 17(7), 601–621.
- Chen, C., Li, Y., 2013. **An Orthogonal Least-Square-Based Method for DEM Generalization**, Int. J. Geogr. Inf. Sci., 27(1), 154–167.
- Chen, Y., Zhou, Q., 2013. **A Scale-Adaptive DEM for Multi-Scale Terrain Analysis**, Int. J. Geogr. Inf. Sci., 27(7), 1329–1348.
- Chen, Z.-T., Guevara, J.A., 1987. **Systematic Selection of Very Important Points (VIP) From Digital Terrain Model for Constructing Triangular Irregular Networks**, in Proceedings of the Eighth International Symposium on Computer-Assisted Cartography (AutoCarto 8); Baltimore, Maryland, USA.
- Douglas, D.H., Peucker, T.K., 1973. **Algorithms for the Reduction of the Number of Points Require to Represent a Digitized Line or its Caricature**, The Canadian Cartographer, 10(2), 112–122.
- Fowler, R.J., Little, J.J., 1979. **Automatic Extraction of Irregular Network Digital Terrain Models**, Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH), 13(3), 199–207.
- Gökgöz, T., 2010. **Obtaining High Fidelity Triangular Regular Network from Only DEM Points**, Cartogr. J., 47(2), 150–156.
- Hengl, T., 2006. **Finding the Right Pixel Size**, Comput. Geosci., 32, 1283–1298.
- Holland, L., Mercier, K., 2012. **Mastering AutoCAD Civil 3D 2013**, Indianapolis, Indiana: John Wiley & Sons.
- Hou, W., Zhang, X., Li, X., Lai, X., Ding, M., 2013. **Poisson Disk Sampling in Geodesic Metric for DEM Simplification**, Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., 23, 264–272.
- Imhof, E., 1965. **Kartographische Geländedarstellung**, Berlin, Germany: Walter de Gruyter & Co.
- Kumler, M.P., 1994. **An Intensive Comparison of Triangulated Irregular Networks (TINs) and Digital Elevation Models (DEMs)**, Cartographica, 31(2), 1–99.
- Lee, J., 1989. **A Drop Heuristic Conversion Method for Extracting Irregular Network for Digital Elevation Models**, in Proceedings of GIS/LIS '89; Orlando, Florida, USA.
- Lee, J., 1991. **Comparison of Existing Methods for Building Triangular Irregular Network Models of Terrain from Grid Digital Elevation Models**, Int. J. Geogr. Inf. Syst., 5(3), 267–285.
- Little, J.J., Shi, P., 2003. **Ordering Points for Incremental TIN Construction from DEMs**, GeoInformatica, 7(1), 33–53.
- Pedrini, H., 2001. **Multiresolution Terrain Modelling Based on Triangulated Irregular Networks**, Revista Brasileira de Geociências, 31(2), 117–122.
- Peucker, T.K., Douglas, D.H., 1975. **Detection of Surface-Specific Points by Local Parallel Processing of Discrete Terrain Elevation Data**, Computer Graphics and Image Processing, 4, 375–387.
- Peucker, T.K., Fowler, R.J., Little, J.J., Mark, D.M., 1977. **Digital Representation of Three Dimensional Surfaces by Triangulated Irregular Networks (TIN)**, Simon Fraser University, Canada.
- Peucker, T.K., Fowler, R.J., Little, J.J., Mark, D.M., 1978. **The Triangulated Irregular Network**, in Proceedings of the American Society of Photogrammetry, Digital Terrain Models Symposium, St. Louis, Missouri, USA, May 9–11.
- Polis, M.F., McKeown, D.M., 1992. **Iterative TIN Generation from Digital Elevation Models**, in Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '92), Champaign, Illinois, USA, June 15–18.

- Takahashi, S., Ikeda, T., Shinagawa, Y., Kunii, T.L., Ueda, M., 1995. **Algorithms for Extracting Correct Critical Points and Constructing Topological Graphs from Discrete Geographical Elevation Data**, Computer Graphics Forum (Eurographics '95), 14(3), 181–192.
- Töpfer, F., Pillewizer, W., 1966. **The Principles of Selection**, Cartogr. J., 3, 10–16.
- Wang, K., Lo, C.-P., Brook, G.A., Arabnia, H.R., 2001. **Comparison of Existing Triangulation Methods for Regularly and Irregularly Spaced Height Fields**, Int. J. Geogr. Inf. Sci., 15(8), 743–762.
- Weibel, R., 1992. **Models and Experiments for Adaptive Computer-Assisted Terrain Generalization**, Cartography and Geographic Information Systems, 19(3), 133–153.
- Yoeli, P., 1984. **Computer-Assisted Determination of the Valley and Ridge Lines of Digital Terrain Models**. International Yearbook of Cartography. 24:197–206.
- Zhou, Q. and Chen, Y., 2011. **Generalization of DEM for Terrain Analysis Using a Compound Method**, ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., 66, 38–45.