

DOI: 10.26650/JGEOG409177

COĞRAFYA DERGİSİ
JOURNAL OF GEOGRAPHY
36 (2018)

<http://jgeography.istanbul.edu.tr>


Jeomorfometri-Yeryüzü Şekillerinin Otomatik Belirlenmesi

Geomorphometry-Automatic Landform Classification

Fatmagül KILIÇ GÜL¹ 

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

ÖZ

Yeryüzü şekilleri, geçmişte fizyografik ve morfometrik haritalarda elle çizilerek gösterilirken, jeomorfometri, sayısal yükseklik modelleri (SYM), görüntü işleme ve coğrafi bilgi sistemleri (CBS) alanındaki gelişmeler şekillerin otomatik çıkarılmasını, veri tabanlarında depolanmasını ve jeomorfoloji, toprak bilimi, ekoloji vb. pek çok alanda daha etkin kullanımını sağlamıştır. Bu tür çalışmalarda temel veri SYM ve ondan hesaplanan eğim, eğrimsellik, yükseklik farkı, topografik açıklık vb. morfolojik parametrelerdir. Yeryüzünde bileşenleri üç boyutlu (3B) olan yamaç, düzlük, vadi vb. şekillerin sınırlarının, iki boyutlu (2B) geometrik elemanlara yazılımlar ile dönüştürülmesinde parametrelerin hesaplanması, şekillenme ile ilişkilerinin kurulması, ölçek, sınıflandırma yöntemi, yeryüzü şekillerinin doğada birbirlerine göre topolojik ilişkileri, homojenlik, genelleştirme halen araştırılan konular arasındadır. Bu çalışmada, farklı disiplinlere mensup araştırmacılar tarafından yeryüzü şekillerinin otomatik belirlenmesine yönelik geliştirilen yöntemler ve uygulamalar incelenmiş, yöntemler; parametrelerin kombinasyonu ile yapılan denetimsiz sınıflandırma; piksel tabanlı denetimsiz/denetimli sınıflandırma ve obje tabanlı sınıflandırma şeklinde ayrıştırılmıştır. Örüntüler, öğrenme tabanlı modeller vb. algoritmalar ile her tür araziye uygulanabilecek modellerin geliştirilmesinin önemi vurgulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Yeryüzü şekilleri, SYM, Sınıflandırma

ABSTRACT

In the past, landforms were represented in physiographic and morphometric maps by hand drawing. With developments in digital elevation models (DEM), geographic information systems (GIS) and image analyses, automatic extraction of landforms from morphological parameters and data storage in databases is now possible and are actively utilized in various fields, such as geomorphology, soil science, and ecology. In the above scopes, DEM data forms the database of morphometric parameters, such as, relief, slope, curvatures, and topographic openness. Presently, calculation of parameters, implementation of relationships with landforms, scaling, classification methods, topological relations, homogeneity, and generalizations during the transformation of 3D components of landforms, such as mountains, peaks, slopes, valleys, and plain, into 2D geometric elements in computers are being investigated. In this study, the methods and applications for the automatic extraction of the landforms developed by researchers across different disciplines were reviewed. Classification methods were grouped as combined parameters method and unsupervised/supervised classification methods based on pixel/object. This paper emphasizes the importance of adopting machine learning to implement new models applicable to all terrains.

Keywords: Landforms, DEM, Classification



Geliş tarihi/Received: 23.03.2018 • **Kabul tarihi/Accepted:** 13.04.2018 • **Online yayın tarihi/Online published:** 07.05.2018

Sorumlu yazar/Corresponding author: Fatmagül KILIÇ GÜL / fkilic@yildiz.edu.tr

Atıf/Citation: Kılıç-Gül, F. (2018). Jeomorfometri-yeryüzü şekillerinin otomatik belirlenmesi. *Coğrafya Dergisi*, 36, 15-26.

<https://doi.org/10.26650/JGEOG409177>

EXTENDED ABSTRACT

In the past, landforms were represented in physiographic and morphometric maps by hand drawing. With developments in digital elevation models (DEM), geographic information systems (GIS), and image analyses, automatic extraction of the landforms from morphological parameters and data storage in databases is now possible and are actively utilized in various fields, such as geomorphology, soil science, and ecology.

Morphometric parameters, such as relief, slope, curvatures, and topographic openness are derived from DEMs, which forms the database for landforms extraction. DEMs are produced with interpolation methods from 3D points or contour lines. The interpolation method and DEMs resolution are crucial for landforms extraction. In landform extraction, DEMs resolutions vary from 250 m to 1 km on a continental basis, from 30 m to 90 m for regional studies, and from 1 m to 30 m for local areas.

Presently, calculation of parameters, implementation of relationships with landforms, scaling, classification methods, topological relations, homogeneity and generalizations during transformation of 3D components of landforms, such as mountains, peaks, slopes, valleys, and plains, into 2D geometric elements in computers are being investigated. Some schemas to transform components from 3D to 2D have developed in some studies. Most commonly used parameters are slope, curvature, and relief. Other parameters are drainage, watershed area, topographic openness, etc.

In this study, the methods and applications for the automatic extraction of the landforms developed by researchers across different disciplines were reviewed. Classification methods were grouped as combined parameters method, unsupervised/supervised classification methods based on pixel/object. This paper emphasizes the importance of adopting machine learning to implement new models applicable to all terrains.

1. GİRİŞ

Dünya'nın yüzeyi, doğal nedenlerle oluşan ve belirli fiziksel özelliklere sahip şekillenmelerin mozaïği gibi düşünülebilir (MacMillan ve Shary, 2009). Dağ, tepe, düzlük, yamaç, vadi vb. yerçekillerinin sınıflandırılması, tipleri ve oluşum nedenlerinin bilinmesi birçok araştırma ve meslek disiplini için önemlidir (Minar ve Evans, 2008). Teknolojideki gelişmeler, bilgisayar ortamı; yeryüzü şekillerinin temel veri olarak kullanılması, şekillerin birbirlerinden ayırt edilerek dijital olarak depolanması ile ilgili araştırmaları da beraberinde getirmiştir. Yeryüzeyinin temel birimleri olan yerçekilleri; jeomorfoloji (Dikau, 1989; Evans, 1980), ekoloji (Minar ve Evans, 2008; Van Assalen ve Seijmonsbergen, 2006), hidroloji (Luo ve Stepinski, 2008; Tarboton ve Ames, 2001), pedoloji (Gruber, Baruck ve Geitner, 2017; Kringer vd., 2009; Macmillian, Pettapiece, Nolan ve Goddard, 2000; Milne, Clayden, Singleton ve Wilson, 1995; Pennock, Zebarth ve DeJong, 1987; Tunçay, Bayramin, Öztürk, Kibar ve Başkan, 2014), arkeoloji ve turizm (Pelfini ve Bollati, 2014; Verhagen ve Dragut, 2012), aktif tektonik (Keller ve Pinter, 2001) ve diğer pek çok alanda çeşitli süreçler için sınır koşullarını oluşturmaktadır.

Bilgisayarların harita çalışmalarında kullanımının başladığı 70'li yıllarda akarsuların, havza sınırlarını oluşturan sırt ve tepelerin sayısal yükseklik modellerinden (SYM) çizgi ve nokta detaylar olarak çıkarılması ile ilgili yapılan araştırmalar günümüzde drenaj ağı ve havzaların otomatik olarak çıkarılması için kullanılan D8 vb. algoritmaların temelini oluşturmuştur (Band, 1986; Jenson ve Domingue, 1988; O'Callaghan ve Mark, 1984; Peucker ve Douglas, 1975; Skidmore, 1990). Benzer şekilde 2000'li yıllara dek yapılan jeomorfoloji ile ilgili araştırmalar da, yeryüzü şekillerinin belirlenmesi için geliştirilen ve günümüzde uygulanan pek çok yöntemin temellerini oluşturmuştur. Bu kapsamda, yeryüzü şekillerinin morfolojik parametreler ile tanımlanması, parametrelerin ve şekillerin birbirleri ile ilişkilerinin kurulması ve ölçek büyüklüğünün yeryüzü şekillerinin belirlenmesine etkilerinin incelendiği çalışmalar önemli yer tutmaktadır (Evans, 1980; Mark, 1975; Pike, 1988; Speight, 1974; Zevenbergen ve Thorne, 1987). Diğer yandan, 3B yeryüzü şekillerinden, 2B geometrik elemanlara geçiş için şemaların ve algoritmaların geliştirilmesi de, yeryüzü şekillerinin otomatik belirlenmesine büyük katkı sağlamıştır (Dikau, 1989; Jasiewicz ve Stepinski, 2013; Miller ve Schaeztl, 2015; Schmidt ve Hewitt, 2004; Shary, 1995; Shary, Sharaya ve Mitusov, 2002; Weiss, 2001; Wood, 1996; Wysocki, Schoeneberger ve LaGarry, 2002).

2000'li yıllardan sonra ise görüntü işleme konusundaki gelişmeler, sınıflandırma ve doğruluk analizi konularındaki araştırmaları artırmıştır. Günümüzde sınıflandırma için SYM'leri kullanarak yapılan çalışmalar iki konu üzerinde yoğunlaşmaktadır; birincisi Lidar verisi gibi yüksek çözünürlüklü veriler ile hidrolojik jeomorfoloji ve erozyon odaklı sınıflandırmalar (Del Val, Iriarte, Arriolabengoa ve Aranburu, 2015; Dragut ve Blaschke, 2006; MacMillan, Martin ve Earle, 2003; Van Asselen ve Seijmonsbergen, 2006) ve ikincisi de orta veya az çözünürlüklü SYM'ler kullanarak fizyografik bölgelerin sınıflandırılmasıdır (Iwahashi ve Pike, 2007; Iwahashi vd., 2018; Jasiewicz, Netzel ve Stepinski, 2014; Piloyan ve Konečný, 2017).

Yeryüzü şekillerinin otomatik çıkarılması ile ilgili araştırmaların incelendiği, bu makalede şu soruların cevabı aranmıştır: Yeryüzü şekilleri örneğin bir yamacın üst, orta, alt kısımları hangi morfolojik özellikler taşır? SYM'den türetilen hangi parametreler ile bu kısımların sınırları belirlenebilir? Ölçek önemli midir? Parametre hesabında filtre (pencere) ne olmalıdır? Parametrelere uygulanacak eşik değerler neler olmalıdır? Parametreler nasıl kombine edilmeli veya sınıflandırılmalıdır? Segmantasyonda hangi parametreler kullanılmalıdır?

Araştırmada, piksellerden/hücrelerden oluşan SYM verilerini kullanan güncel uygulamalar incelenmiştir. Üçgenlerden oluşan SYM yapısı, yüzey modelleri ve batimetrik modeller ile yapılan çalışmalar kapsam dışı bırakılmıştır. Benzer şekilde Mars vb. gezegenler, deniz tabanı ile ilgili yapılan çalışmalarda araştırmaya dahil edilmemiştir.

2. SAYISAL YÜKSEKLİK MODELLERİ

SYM, yeryüzünün karelere bölünmüş bir matrisi olarak düşünülebilir. Karelerde, üretim sırasında tanımlanan düşey datuma göre hesaplanmış, metrik yükseklik değerleri bulunmaktadır. Bilgisayar ortamındaki dosyada matrisin ilk karesinin, yine üretim sırasında tanımlanmış yatay datumda, konum koordinatları kayıtlıdır. Kayıtlı olan diğer unsurlar matrisin satır ve sütun sayısı ve karenin büyüklüğüdür (piksel-hücre büyüklüğü, çözünürlük). SYM'lerde karelere düşecek yükseklik değerleri, yeryüzeyinin örneklenmiş noktasal ölçümlerinden, nokta bulutlarından veya mevcut haritaların eş yükseklik eğrilerinden enterpolasyon ile hesaplanır. Noktaların koordinatları; harita mühendisliği disiplinin uzmanlık alanı olan; arazide GPS, total station, nivo vb aletler ile yapılan doğrudan ölçüm veya Lidar verilerinden, fotoğraflardan, görüntülerden fotogrametri ve uzaktan algılama teknikleri ile yapılan dolaylı ölçümlerin dengelenmesi ile belirlenir. Noktaların yükseklikleri

dünyanın geometrik şekli olan jeoide bağlı olarak hesaplanmaktadır. Dünya çapında geliştirilen WGS84 elipsoit ve datumu ile EGM96 jeoidi hem deniz hemde karasal bölgelerde jeoidin modellenmesinde önemli katkılar sağlamış, dolayısıyla uydu görüntülerinden dünya çapında SYM'leri oluşturulabilmiştir. İnternet üzerinden yüklenebilen SRTM 30 m ve 90 m, Aster GDEM 30 m çözünürlüklü yükseklik verileri çalışmalarda en çok kullanılan uydu kaynaklı verilerdir.

Noktalardan sonra yeryüzünün kareler ile temsiline enterpolasyon ile geçilmektedir. 1950'li yıllardan günümüze dek; üçgenleme, spline fonksiyonlar, jeostatistik enterpolasyon yöntemleri vb. birçok yöntem enterpolasyonda kullanılmaktadır. Yeryüzü şekillerinin belirlenmesi çalışmalarında çoğunlukla, drenaj ağı gibi yükseklik değişimlerini de dikkate alan Hutchinson (1988) tarafından geliştirilen ANUDEM algoritması ile enterpolasyon uygulanmaktadır.

Jeomorfometrik çalışmalarda genel olarak; kıtalar bazında 250 m ile 1 km, bölgesel çalışmalarda 30 m ile 90 m, lokal çalışmalarda ise 1 m ile 30 m arasındaki çözünürlüklü SYM'ler kullanılmaktadır.

3. MORFOMETRİK PARAMETRELER VE ÜÇ BOYUTLU YERYÜZÜNÜN İKİ BOYUTLU GEOMETRİ İLE TEMSİLİ

1970'lerin başında jeomorfometri kapsamında araştırılan önemli konulardan bir tanesi yamaç, vadi vb. yeryüzü şekillerini geometrik olarak tanımlanabilen bölgelere ayırmaktır. Buna 3B objelerden 2B objelere geçmek için hazırlanan kavramsal şemaların tasarımı da denilebilir. Eğim, yükseklik farkı, eğrisellik vb. parametreler ile şekiller arasındaki ilişkilerin tespit edilip hesapların yapılması ile yeryüzü şekillerinin sınırları, o zamandan buyana geliştirilen algoritmalar ile belirlenebilmektedir. Bu konu ile ilgili yapılmış önemli çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Ruhe (1960) yamaç profilinin geometrisini değerlendirerek yamacı 5 geometrik bileşene ayırmış ve özellikle eğrisellik ile ilişkilerini açıklamıştır. Dikau (1989), orta ve mikro düzeydeki yeryüzü şekillerini, özellikle de yamaç bileşenlerini otomatik çıkartmak için bir şema tasarlamış, eğim, bakı ve eğrisellik değerlerini kombine ederek homojen şekillenmeleri, plan ve profil eğrisellik değerleri ile de bu alanları sınıflandırmayı önermiştir. Şema başta Schmidt ve Hewitt (2004), Dragut ve Blaschke (2006) olmak üzere birçok çalışmada kullanılmıştır. Brabyn (1998), Dikau'nun (1989) uygulanması sonucu görülen az engebeli arazilerin sınıflandırılmasındaki sorunun çözümü

için 3 x 3 piksel şeklinde kare pencerenin yerine daire kullanılmasını önermiştir. Speight (1990), yeryüzü şekillerini tanımlamış ve çalışmaları birçok çalışmada standart olarak kullanılmıştır. Shary (1995) ve sonraki yıllarda 3B modelden 2B geometrik gösterimlere geçişte kullanılmak üzere eğriselliğin gravite ile ilişkisi konusunda çalışmalar yapmış ve yazılımlar için kavramsal şemalar, algoritmalar tasarlamıştır.

Wood (1996), düzlük, akarsu, sırt, boyun, tepe ve çukurların tanımlanmasını 3 x 3 piksel ile yapmış ve modelin eğim, eğrisellik parametreleri ile ilişkisini kurmuştur. Bir yazılımın da geliştirildiği bu çalışmada yamaçlar yer almamıştır. Weiss (2001), eğim, eğrisellik vb. parametrelerin SYM çözünürlüğü ile doğrudan ilişkisini değerlendirmiş ve hesaplarda bir nevi genelleştirme aşaması da olan hesap penceresi büyüklüğü ile yer şekillerinin ilişkisini araştırmıştır. Weiss, topografik konum indeksi (TPI) (ing. Topographic Position Index) kapsamında bir algoritma geliştirmiş ve programlamıştır. Günümüzde birçok yazılımda yer alan bu algoritmada bir penceredeki ortalama yükseklik ile merkezdeki pikselin yüksekliği karşılaştırılmaktadır. Schmidt ve Hewitt (2004), Dikau'nun modelini de dikkate alarak düzlükleri de içeren yeni bir şema geliştirmişlerdir. Bolongaro, Torres-Rodríguez, Sorani, Framed ve Ortiz (2005), Wood'u (1996) dikkate alarak morfometrik parametreleri değerlendirmiş ve yeryüzü şekillerinin sınıflandırılması için üçgenlere dayanan bir şema geliştirmişlerdir.

Yukarıdaki yaklaşımlardan farklı olan diğer bir şemayı öneren Jasiewicz ve Stepinski (2013), topografik açıklık parametresi ve yapay görme kavramlarını kullanarak yer şekillerini örüntü olarak tanımlamışlardır (jeomorfon). Yöntemde yükseklik verisi ve belirlenen bir mesafe değeri kullanılarak, bir pikselin etrafında, sekiz farklı yönde topografik açıklık değeri hesaplanmaktadır. Çalışmada, yükseklik farkı ve yöne göre 498 ayrı türde yeryüzü şekli örüntüsü tasarlanmıştır. Örüntüler ile pikselin değerleri karşılaştırılmakta ve genelleştirilmiş 10 yeryüzü şekli sınıftan biri olarak pikselin yeni değeri belirlenmektedir. Düzlük, tepe ve çukur tek içerikli bir desen (aynı yükseklikte), yamaç alt ve üst bileşenleri iki geçişli bir desen, sırt vadi ve yamaç dört geçişli birer desen oluşturmaktadır. Açıklığın ölçüldüğü mesafe uzun ise geniş alan kaplayan yeryüzü şekilleri kısa ise daha küçük boyuttaki şekiller adlandırılabilirlerdir.

Tablo 1, 2 ve 3'te gösterilen çalışmaların pek çoğunda yukarıda açıklanan şemalar kullanılmıştır. En çok kullanılan parametreler de eğim ve eğrisellik değerleridir. Bu parametrelere, topografik açıklık, bakı, yükseklik farkı, drenaj yoğunluğu, drenaj ağı, havza sınırı, engebe düzeyi, nemlilik indeksi ve güneş ışıması parametreleri de uygulamalarda eklenmiştir. Yükseklik

farkı, topografik açıklık ve drenaj ile ilgili parametrelerin kullanımı sınırların ayırt edilebilirliğini arttırmıştır.

4. SINIFLANDIRMA

1960'ların sonlarında başlayan uzaktan algılanan görüntülerin işlenmesi, 1970'lerde LANDSAT uydü görüntülerinin aktif olarak kullanılmaya başlanması ve bunu izleyen teknolojik gelişmeler ile bilim insanları için önemli bir araştırma alanı olmuştur. Görüntü analizi ve işleme konularının arasında yer alan sınıflandırmada amaç, hedeflenen obje gruplarının birbirlerinden en yüksek düzeyde ayrıştırılarak görüntüden elde edilebilmesidir. Böylelikle bir sınıf içinde homojenlik artırılırken farklı sınıflar arasındaki benzerliğin azaltılması sağlanmaktadır. Sınıflandırma probleminin çözümü için çok farklı yaklaşımlar mevcuttur. Başlangıçta sınıflandırmada sadece spektral değerler kullanılmasına karşın, görüntü işleme teknolojisindeki gelişmeler ile doku, görüntü topolojisi, morfolojik parametrelerin de içerildiği bir çok yöntem geliştirilmiştir. Günümüzde yapay zeka, makine öğrenme, derin öğrenme vb. yaklaşımların sınıflandırma probleminin çözümü ve doğruluğun artırılmasına yönelik önemli katkısı söz konusudur (Jamil ve Bayram, 2018). Uzaktan algılamada uydü görüntüleri kullanırken, jeomorfoloji de SYM'den elde edilen morfolojik parametrelerin değerleri, görüntüleri kullanılmaktadır.

Sınıflandırma yöntemleri; sınıf örneklerinin değerlendirme sistemine dahil edilmesi ile denetimli sınıflandırma, diğer halde de denetimsiz sınıflandırma olarak ayrılabilir. Yöntemlerde diğer bir ayrım piksel tabanlı ve obje tabanlı sınıflandırma şeklinde yapılmaktadır. Piksel tabanlı yaklaşımlarda, belirlenen ölçütlere göre görüntüdeki her bir piksel, hedeflenen sınıf yada sınıflara atanmaktadır. Obye tabanlı yöntemlerde ise piksel gruplarından homojen segmentler (bölütler, çokgenler) elde edilerek, pikseller yerine segmentlere sınıflandırma algoritmaları uygulanmaktadır. Sınıflandırma sonucu üretilen sınıfların doğruluğu, arazide yapılan ölçümler, mevcut görüntüler veya haritalardaki örnekler ile karşılaştırılarak belirlenmektedir (Congalton ve Green, 1999). Kapa vb. istatistiki hesaplamalar ile de iki sistemin benzerliği test edilmektedir.

Yeryüzü şekillerinin sınıflandırılması ile ilgili araştırmalarda; piksel tabanlı, parametrelerin kombinasyonu ile yapılan denetimsiz sınıflandırma; piksel tabanlı, ISOdata, k-ortalama vb. istatistiki yöntemler ile denetimsiz sınıflandırma, en çok benzerlik, öğrenme temelli yöntemler vb. ile yapılan denetimli sınıflandırma ve objeye yönelik sınıflandırma yöntemleri uygulanmaktadır (Tablo 1, 2 ve 3). Sınıflandırma öncesi parametrelerin ilk değerleri SYM'den ya özel algoritmalar ile

veya ArcGIS, SAGA, QGIS vb. CBS yazılımlarındaki arayüzler ile hesaplanmaktadır. Tablo 1, 2 ve 3'te gösterilen araştırmalarda; yükseklik, eğim ve eğrisellikler parametre olarak kullanılmıştır. Araştırmacıların kullandığı diğer parametreler tabloda verilmiştir.

Bu alanda ilk yapılan çalışmalardan biri klasik yollar ile Hammond (1954) tarafından gerçekleştirilmiştir. Hammond, haritanın üzerine çizdiği karelerde yükseklik farkı (rölyef), eğim ve profil değerlerini hesaplayıp sınıflandırarak fizyografyanın ilk sistematik sınıflandırmasını yapmıştır ve metodolojisi orta ve küçük ölçekli harita yapımı için uygulanabilecek bir çalışma olarak literatürde yer almıştır. Hammond'un makalesinde çok açık yazdığı bu sınıflaması günümüze dek pek çok araştırmacı tarafından CBS ortamında uygulanmış ve programlar geliştirilmiştir (Brabyn, 1998; Dikau, Brabb ve Mark, 1991; Drescher ve Frey, 2009; Gallant, Brown ve Hoffer, 2005; Gökğöz ve Moustafa Khalil, 2015; Hrvatin ve Perko, 2009; Karagülle vd., 2017; Kılıç ve Öztürk, 2013; Martins, Fernandez, Isidoro, Jordán ve Zavala, 2016; Morgan ve Lesh, 2005). Dikau vd. (1991) Hammond'un sınıflandırma sistemini CBS kullanarak ilk otomatize eden araştırmacıdır. 250 m çözünürlüklü SYM ile New Meksika'nın dijital morfolojik haritasını oluşturmuşlardır. Kombinasyonda 9.8 km x 9.8 km'lik bir pencere kullanmışlardır.

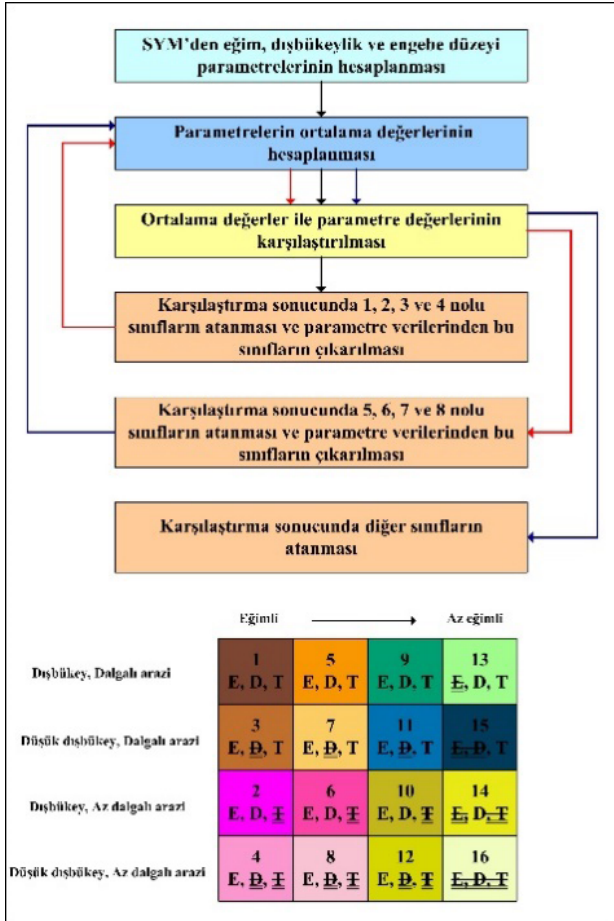
4.1 Parametrelerin kombinasyonu ile yapılan denetimsiz sınıflandırma

Yeryüzü şekillerine göre parametrelerin eşik değerlerinin belirlendiği ve sonrasında da parametrelerin kombine edilerek sınıflandırmanın yapıldığı bu tür çalışmalarda, sınıflandırılmış verinin piksel tabanlı olması nedeniyle sonuçların genelleştirilmesi gerekmektedir. Bu sınıflandırma türünde, mevcut CBS yazılımları geliştirilen arayüzler ile kullanılabilirliği gibi, CBS komutlarını kullanarak da kullanıcı tarafından değişik varyasyonlar uygulanabilmektedir. Bu nedenle alan konusunda uzman bir jeomorfoloj ve/veya ölçeği uygun bir jeomorfoloji haritası ile değerlendirildiğinde kolay ve doğru sonuçların alınabileceği düşünülmektedir. **Tablo 1**'de gösterilen ve

Tablo 1: Parametrelerin kombinasyonu ile sınıflandırmanın yapıldığı araştırmalar

Table 1: Classification studies with combination of parameters

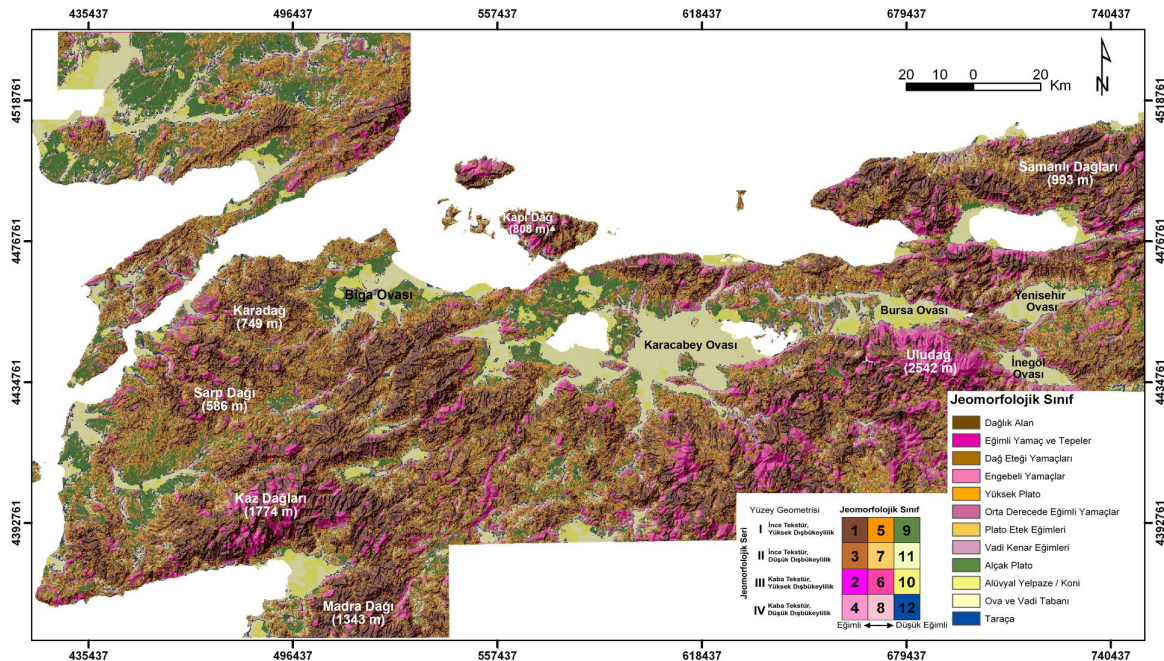
Yazarlar	SYM (m)	Ek parametreler
Iwahashi ve Pike, 2007	55, 70, SRTM 1000	Engebe oranı
Klingseisen vd., 2007	10	Yükseklik farkı ve değişimi
Norini, Zuluaga, Ortiz, Aquino ve Lagmay, 2016	SRTM 30	Drenaj
Kramm vd., 2017	5, 10, GDEM, SRTM 30	Topografik açıklık



Şekil 1: Iwahashi ve Pike (2007) modelinin işlem akış diyagramı.
Figure 1: Process flow diagram for Iwahashi and Pike (2007).

incelenen diğer çalışmalarda da rastlanılan en büyük sorun sınıfların homojenliği ve birbirleri ile topolojik ilişkilerinin dikkate alınmamasıdır. Bu sorunlar sınıflandırmanın görsel olarak incelenmesi ile düzeltilebilmektedir.

Iwahashi ve Pike (2007), eğim, dışbükeylik ve engebe (dalgalılık) parametrelerini kullanarak sekiz, oniki ve onaltı sınıf olmak üzere birbirine benzer mantıkta türetilen ancak ayrıntısı gittikçe artan bir sınıflandırma yöntemi geliştirmişlerdir. Şekil 1'de gösterilen akış diyagramında belirtildiği gibi parametrelerin ortalama değerleri 3 x 3 pikselden oluşan bir pencere ile hesaplanmaktadır. Şekilde, E-eğim, D-dışbükeylik, T-dalgalılık düzeyini göstermektedir. Üstü çizgili olan harfler ilgili ortalamadan düşük olan değerleri göstermektedir. Her pikselin parametre değerleri ile ortalama değerleri arasındaki farklar hesaplanmaktadır. 16'lı sınıflandırmaya örnek verilirse; eğim, dışbükeylik ve dalgalılık düzeyi ortalamadan yüksek olan pikseller 1 nolu sınıfa, eğim ve dışbükeylik değeri ortalamadan yüksek olan ancak dalgalılık düzeyi düşük olanlar 2 nolu sınıfa, benzer şekilde dışbükeylik değeri düşük olan pikseller 3 nolu sınıfa, bir tek eğim değeri ortalamadan yüksek olan pikseller 4 nolu sınıfa atanmaktadır. Parametre verilerinden bu sınıflar çıkarılarak, geride kalan pikseller için tekrar ortalamalar hesaplanmaktadır. Ortalamalar ile parametre değerleri karşılaştırılarak yukarıda açıklandığı gibi 5, 6, 7 ve 8 nolu sınıflar belirlenmektedir. Geride kalan pikseller için ortalamalar hesaplanmakta ve karşılaştırmalar ile diğer 8 sınıf belirlenmektedir. Sınıfların dağ, tepe, yamaç vb isimlendirilmesinde, uzman görüşleri dikkate alınmaktadır.



Şekil 2: Iwahashi ve Pike (2007) modeline göre sınıflandırma sonucu üretilen jeomorfoloji haritası (Batuk vd., 2008).
Figure 2: Geomorphological map produced according to Iwahashi and Pike (2007) classification model (Batuk vd., 2008).

Bu yöntemi, farklı çözünürlükteki SYM'leri ve farklı pencere büyüklükleri ile bir çok araştırmacı denemiştir (Batuk, Emem, Görüm ve Gökaşan, 2008; Kılıç ve Öztürk, 2013; Stepinski ve Bagaria, 2009). Bu yöntemle hazırlanmış bir örnek **Şekil 2**'de gösterilmiştir.

Klingseisen, Metternicht ve Paulus (2007), Landform adıyla geliştirdikleri arayüz ile eğrisellikler, eğim, alçak piksellerin oranı ve yükseklik farkı parametrelerine uyguladıkları eşik değerler ile tepe, düzlük, yamaç bileşenleri ve çöküntü alanlarını otomatik olarak çıkarmışlardır. Sonuçlarını birçok araştırmadan farklı olarak "Map Comparison Kit" yazılımını kullanarak, uzmanların sınıflandırdığı bir harita ile karşılaştırmışlardır.

Kramm vd. (2017), piksel tabanlı Dikau, Brabb, Mark ve Pike (1995), Weiss (2001) TPI, Jasiewicz ve Stepinski (2013) Jeomorfon, Dragut ve Blaschke (2006) obje tabanlı sınıflandırma yöntemlerini 5 m ve 10 m SYM, Aster GDEM ve SRTM 30 m için karşılaştırma amaçlı uygulamışlardır. Doğruluk değerlendirmesi için arazide boyuna kesit ölçümleri ve noktasal ölçümler yapmışlardır. Yüksek çözünürlüklü veride TPI ve jeomorfon iyi sonuçlar vermiş, 30 m SYM ile yapılan çalışmada SRTM daha iyi sonuçlar vermiştir.

İncelenen araştırmaların çoğunda 30 m çözünürlükteki SYM'nin küçük boyuttaki yeryüzü şekilleri için yeterli olmadığı belirtilmiştir.

4.2. Piksel tabanlı denetimsiz ve denetimli sınıflandırma

Görüntü işleme, görüntü analizi veya kümeleme yazılımları ile uygulanan piksel tabanlı sınıflandırma yöntemlerinin sonucunda oluşturulan verinin yine genelleştirilmesi gerekmektedir. **Tablo 2**'de incelenen araştırmaların bir kısmı ve özellikleri gösterilmiştir.

Fisher, Wood ve Cheng (2004), farklı büyüklüklerdeki yeryüzü şekillerinin bir modelden, aynı pencere büyüklükleri ile çıkartmada ortaya çıkan doğruluk, tamlık vb. problemleri azaltmak için bulanık mantık ile analizlerin yapılmasının daha uygun olabileceğini düşünmüşler ve 3x3 den 75x75 piksele değişen pencere büyüklükleri ile Wood'a (1996) göre sınıflandırma yapmışlardır. Doğruluk analizinde mevcut haritaları kullanmışlardır. Benzer bir çalışmayı Arrell, Peter, Tate ve Bastin (2007), 50 m çözünürlüklü SYM, eğim, bakı, eğrisellik parametrelerini kullanarak bulanık c-ortalama yöntemi ile uygulamışlardır. SYM'yi 100, 200 ve 400 m'ye örnekleyerek ölçek ve farklı sınıf sayıları ile sırtlar, düzlükler, akarsu ve yamaçların ölçek ile ilişkisini araştırmışlardır. Schmidt ve Hewitt (2004), başlangıçta eğim ve eğrisellik değerlerini kullanarak bulanık mantıkla sınıflandırmış, sonrasında TPI ile topolojik ilişkileri değerlendirilerek sınıflandırmalarını tamamlanmışlardır. Eğim ve eğriselliğin ölçeğe çok bağımlı olduğunu belirtmişlerdir.

Örneklem verilerinin de sisteme dahil edildiği piksel tabanlı denetimli sınıflandırmayı uygulayan Prima, Echigo, Yokoyama, Yoshida (2006), 50 m çözünürlüklü SYM, eğim, topoğrafik açıklık (0.15 km, 5 km) verilerini kullanmışlardır. Mevcut haritalar ve eğri yorumlarından çıkarılmış örneklem verileri ile denetimli sınıflandırma yapılmış ve volkanlar, alüvyal fan, alüvyal düzlükler, dağlar ve tepeler olarak yer şekilleri sınıflandırılmıştır.

Gruber vd., (2017), çalışmalarında toprak araştırmacılarının arazi çalışması verilerini, 2.5 m Lidar SYM kullanarak büyük ve orta ölçek için sınıflandırma yapmışlardır. Düzlük, çukur ve akarsular, sediment birikimleri, yamaç bileşenleri ve sırtların Dikau, Wood, Jeomorfon, TPI, Schmidt ve Helwitt (2004) şemalarındaki karşılıklarını eşleştirmişler, SYM çözünürlüğü, pencere büyüklükleri ve parametrelerin eşik değerlerini değiştirerek ve destek vektör makineleri (SVM) yöntemini de

Tablo 2. Piksel tabanlı sınıflandırma yapılan araştırmalar.
Table 2. Pixel-based classification studies.

Yazarlar	SYM (m)	Ek parametreler	Yöntem
Denetimsiz Sınıflandırma			
Ventura ve Irvin, 2000	10	Nemlilik indeksi, güneş ışınımı	Bulanık k-ortalama, ISOData
Burrough, Van Gaans ve MacMillan, 2000	5, 75		Bulanık k-ortalama
Moravej, Karimian Eghbal, Toomanian ve Shahla Mahmoodi, 2012	GDEM	Yükseklik farkı	k-ortalama
Denetimli Sınıflandırma			
Prima vd., 2006	50	Topoğrafik açıklık	Jeffries-Matusita Mesafesi
Zhao vd., 2017	SRTM 30	Engebe oranı	Rastgele orman alg.

ekleyerek sınıflandırmalar yapmışlardır. Herbirinde yeryüzü şekillerini en iyi veren parametreleri ve eşik değerlerini belirlemişler ve doğruluk analizi yapmışlardır.

Zhao, Xiong, Ding ve Tang (2017), SRTM 30 m çözünürlüklü SYM ile alt havza sınırlarında taraça, dağlar, tepeler, sırtlar vb. yeryüzü şekillerini sınıflandırmak için öğrenme tabanlı rastgele orman algoritmasını ve yükseklik, eğim, eğrisellik ve yamaç eğimi parametrelerini kullanmışlardır. Havza sınırını segment olarak düşünmüşler, çok düzeyli segmentasyon ile de karşılaştırmışlardır.

4.3. Segmentasyon, obje tabanlı denetimsiz ve denetimli sınıflandırma

eCognition yazılımının gelişimiyle artan objeye yönelik sınıflandırma, pikseller ile çalışmak yerine bir veya daha çok parametre kullanarak alanı segmentlere ayırmak ve sonrasında da diğer parametrelerin incelenmesiyle segmentleri adlandırmak, sınıfları belirlemek şeklinde uygulanmaktadır. Segmentasyon kenar veya bölge tabanlı olarak uygulanabilmekte, sınıflandırmada bulanık kurallar veya en yakın komşuluk ilişkileri kullanılabilir. **Tablo 3**'de gösterilen araştırmaların çoğunda sınıflandırmada bulanık mantık kuralları kullanılmıştır. Obe tabanlı sınıflandırmanın, bu alanda denetimsiz olamayacağı düşünüldüğünden incelenen çalışmalar için bir ayırım yapılmamıştır.

Romstad (2001), piksel tabanlı çıkarılan yeryüzü şekillerinin birbirileri ile topolojik ilişkisini değerlendirerek başlangıçta yapılacak bir segmentasyonun daha anlamlı sonuçlar çıkarabileceğini belirtmiştir. Segmentasyonda genelleştirme ilkelerini kullanmıştır. Sınırların çok keskin olmaması nedeniyle sınıflandırmada bulanık mantık kurallarının uygulanmasını önermişlerdir. Benzer şekilde Blaschke ve Strobl (2003), segmentasyonun yeryüzü şekillerinin sınırlarının homojen olarak çıkarılmasını sağlayabileceğini belirtmişlerdir. Minar ve

Evans (2008), segmentasyon kavramlarını dikkate alarak yeryüzü şekillerinin belirlenmesinde elementer formların kullanılmasını önermişlerdir.

Dragut ve Blaschke (2006) çalışmalarını, farklı ölçeklerde SYM'lere uygulanabilecek ortak bulanık mantık kurallarını tespit etmek ve dağlık alanlarda yer şekillerinin sınıflandırılmasını geliştirmek amacıyla yapmışlardır. Başlangıçta yükseklik farkı verisi ile segmentasyon uygulamışlardır. Dikau'nun (1989) eğriselliğe bağlı yaptığı dokuzlu sınıflamayı uyarlamışlar ve yükseklik, yamaç eğriselliğinin yatay ve düşey bileşeni parametreleri için kurallar geliştirmişlerdir. Yükseklik farkına göre alanlar önce yüksek, orta ve alçak olarak ayrılmış, yüksek yerler düzlük, zirve ve yamaç, orta yükseklikteki yerler düzlük ve yamaç, alçak yerlerde dağ eteği ve yamaç olarak ayrılmıştır. Diğer çalışmalardan farklılıklarının komşuluk ilişkileri ve topolojiyi dikkate almak olduğunu, yükseklik farkı ve bulanık kuralları kullanmaları nedeniyle sınıflandırmanın çok duyarlı olduğunu belirtmişlerdir. Bulanık mantık çalışmasında öncül kuralların uzmanlarca belirlendiği böylece uzman olmayan kişilerin de sistemi kullanabileceği, mevcut sistemler ile karşılaştırdıklarında sınıflandırma adımlarındaki insan hatalarının ve işlem zamanının azaltıldığını belirtmişlerdir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Yeryüzü şekillerinin sınırlarının belirlenmesinde en önemli konu üç boyutlu şekli iki boyutlu geometrik elemanlara dönüştürebilecek algoritmaların belirlenmesidir. Belirlenmek istenen şeklin büyüklüğü, SYM'nin çözünürlüğü, SYM'den hesaplanan eğim, eğrisellikler, yükseklik farkı vb. morfolojik parametrelerin değerleri, işlenecekleri pencere büyüklükleri bu dönüşümde büyük rol oynamaktadır.

Yeryüzü şekillerinin belirlenmesinde parametre hesabından sonraki aşama sınıflandırmadır. Sınıflandırma, parametrelere eşik değerlerin uygulanması ve sonuçların kombinasyonu veya

Tablo 3. Obe tabanlı sınıflandırma yapılan araştırmalar.

Table 3. Object-based classification studies.

Yazarlar	SYM (m)	Ek parametreler	Segmentasyon
Dragut ve Blaschke, 2006	5, 46, 57	Yükseklik farkı	Yükseklik farkı
Kringer vd., 2009	20, Lidar 2.5	Akarsulara mesafe, havza alanı	Eğim ve nemlilik indeksi
Anders, Seinjonsbergen ve Bouten, 2011	Lidar 1	Alçak alanların oranı	Eğim ve topografik açıklık
Seijmonsbergen, Hengl ve Anders, 2011	Lidar 1	Yükseklik oranı, akarsu, yükseklik farkı	Topografik açıklık
Romstad ve Etzelmüller, 2012	20	Eğrisellik	Eğrisellik
Mashimbye, De Celercq ve Van Niekerk, 2014	5, SRTM 90, GDEM	Baki	Eğim, baki

görüntü sınıflandırmaya benzer şekilde piksel/tabanlı denetimli/denetimsiz sınıflandırma ve obje tabanlı sınıflandırma şeklinde uygulanmaktadır. Hepsinde mevcut durumu değerlendirerek, eşik değerlerin belirlenmesi, komşu sınıra sahip farklı şekillerin anlamlılığı gibi topolojik ilişkilerin tespit edilmesi gerçek anlamda sınırlara erişmek için önemlidir. Yeryüzü şekillerinin karmaşık olması, doğası gereği belirli bir sistematığı izlememesi günümüze dek halen bir standart geliştirilememesinin ana nedenidir. Benzer uygulamalarda benzer olduğu kadar olmayan pek çok parametreler de kullanılmıştır. Günümüze dek gerçekleştirilen uygulamaların bilgi tabanlı öğrenme, yapay zekâ algoritmalarına aktarılması, uzman jeomorfoloğların denetimi bu konuda az da olsa örneklem sağlayabilecektir. Ne tür yeryüzü şekilleri, hangi çözünürlükte, hangi parametreler ile ve hangi algoritmalar ile başarıyla sınıflandırılabilir? Bu sorunun, yeni araştırmalar ve özellikle de öğrenme tabanlı algoritmalar ile yanıtlanabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Anders, N. S., Seijmonsbergen, A. C., & Bouten, W. (2011). Segmentation optimization and stratified object-based analysis for semi-automated geomorphological mapping. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 2976–2985. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.007>
- Arrell, K. E., Fisher, P. F., Tate N. J., & Bastin, L. (2007). A fuzzy c-means classification of elevation derivatives to extract the morphometric classification of landforms in Snowdonia, Wales. *Computers & Geosciences*, 33(10), 1366–1381. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.05.005>
- Band, L. E. (1986). Topographic partition of watersheds with digital elevation models. *Water Resources Research*, 22(1), 15–24. <https://doi.org/10.1029/WR022i001p00015>
- Batuk, F., Emem, O., Görüm, T., & Gökaşan, E. (2008, June). *Implementation of GIS for landforms of Southern Marmara*. Paper presented at Integrating Generations. FIG Working Week 2008, Stockholm, Sweden.
- Blaschke, T., & Strobl, J. (2003). Defining landscape units through integrated morphometric characteristics. In E. Buhmann & S. Ervin (Eds.) *Landscape modelling: Digital techniques for landscape architecture* (pp. 104–113). Heidelberg, DE: Wichmann Verlag.
- Bolongaro Crevenna, A., Torres-Rodríguez, V., Sorani, V., Framed, D., & Ortiz, M. A. (2005). Geomorphometric analysis for characterizing landforms in Morelos State, Mexico. *Geomorphology*, 67(3–4), 407–422. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.11.007>
- Brabyn, L. (1998). GIS analysis of macro landform. In *Proceedings of the Spatial Information Research Centre's 10th Colloquium, November* (pp.35–48). Research Centre.
- Burrough, P. A., Van Gaans, P. F. M., & MacMillan, R. A. (2000). High-resolution landform classification using fuzzy k-means. *Fuzzy Sets and Systems*, 113(1), 37–52. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(99\)00011-1](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(99)00011-1)
- Congalton, R., & Green, K. (1999). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices*. New York, NY: Lewis Publishers.
- Del Val, M., Iriarte, E., Arriolabengoa, M., & Aranburu, A. (2015). An automated method to extract fluvial terraces from LiDAR based high resolution digital elevation models: The Oiartzun Valley, a case study in the Cantabrian margin. *Quaternary International*, 364, 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.10.030>
- Dikau, R. (1989). The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. In J. Raper (Ed.), *Three dimensional application in geographic information systems* (pp. 51–77). London, UK: Taylor & Francis.
- Dikau, R., Brabb, E. E., & Mark, R. M. (1991). Landform classification of New Mexico by computer. *USA- Geological Survey Open File Report*, 91(634), 1–16.
- Dikau, R., Brabb, E., Mark, R. K., & Pike, R. J. (1995). Morphometric landform analysis of New Mexico. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 101, 109–126.
- Dragut L., & Blaschke, T. (2006). Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology*, 81(3–4), 330–344. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.04.013>
- Drescher, K., & Frey, W. D. (2009). Landform classification using GIS. *Position IT, August-Sept*, 30–34. Retrieved from <https://www.ee.co.za/wp-content/uploads/legacy/PositionIT%202009/page%2030-34.pdf>

- Evans, I. S. (1980). An integrated system of terrain analysis and slope mapping. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband, 36*, 274–295.
- Fisher, P., Wood, J., & Cheng, T. (2004). Where is Helvellyn? Fuzziness of multi-scale landscape morphometry. *Transactions of the Institute of British Geographers, 29*(1), 106–128. <https://doi.org/10.1111/j.0020-2754.2004.00117.x>
- Gallant, A. L., Brown, D. D., & Hoffer, R. M. (2005). Automated mapping of Hammond's landforms. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2*(4), 384–388. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2005.848529>
- Gökgöz, T., & Moustafa Khalil, M. B. (2015). Large scale landform mapping using Lidar DEM. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 4*(3), 1336–1345. <https://doi.org/10.3390/ijgi4031336>
- Gruber, F. E., Baruck, J., & Geitner, C. (2017). Algorithms vs. surveyors: A comparison of automated landform delineations and surveyed topographic positions from soil mapping in an Alpine environment. *Geoderma, 308*, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.017>
- Hammond, E. H. (1954). Small scale continental landform maps. *Annals of Association of American Geographers, 44*, 33–42.
- Hrvatın, M., & Perko, D. (2009). Suitability of Hammond's method for determining landform units in Slovenia. *Acta Geographica Slovenica, 49*(2), 343–366. <https://doi.org/10.3986/AGS49204>
- Hutchinson, M. F. (1988). Calculation of hydrologically sound digital elevation models. In *Proceedings of the Third International Symposium on Spatial Data Handling* (pp. 117–133). Columbus, Ohio: International Geographical Union
- Iwahashi, J., & Pike, R. (2007). Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. *Geomorphology, 86*(3–4), 409–440. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.012>
- Iwahashi, J., Kamiya, I., Matsuoka, & Yamazaki, D. (2018). Global terrain classification using 280 m DEMs: Segmentation, clustering, and reclassification. *Progress in Earth and Planetary Science, 5*(1), 1–31. <https://doi.org/10.1186/s40645-017-0157-2>
- Jamil, A., & Bayram, B. (2018). Tree species extraction and land use/cover classification from high-resolution digital orthophoto maps. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 11*(1), 89–94. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2756864>
- Jasiewicz, J., & Stepinski, T. F. (2013). Geomorphons—a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology, 182*(2013), 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.005>
- Jasiewicz, J., Netzel P., & Stepinski, T. F. (2014). Landscape similarity, retrieval, and machine mapping of physiographic units. *Geomorphology, 221*, 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.06.011>
- Jenson, S. K., & Domingue, J. O. (1988). Extracting topographic structure from digital elevation data for GIS analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 54*(11), 1593–1600.
- Karagulle, D., Frye, C., Sayre, R., Breyer, S., Aniello, P., Vaughan, R., & Wright, D. (2017). Modeling global Hammond landform regions from 250-m elevation data. *Transactions in GIS, 21*(5) 1040–1060. <https://doi.org/10.1111/tgis.12265>
- Keller, E. A., & Pinter, N. (2001). *Active tectonics: Earthquakes, uplift and landscape*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Kılıç, F. ve Öztürk, D. (2013, Mayıs). *Yeryüzü şekillerinin sayısal yükseklik modelleri ile otomatik çıkarılması*. Türkiye Ulusal Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği V. Sempozyumu'nda sunulan bildiri, Trabzon.
- Klingseisen, B., Metternicht, G., & Paulus, G. (2007). Geomorphometric landscape analysis using a semi-automated GIS-approach. *Environmental Modelling & Software 23*(1), 109–121. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.05.007>
- Kramm, T., Hoffmeister, D., Curdt, C., Maleki, S., Khormali, F., & Kehl, M. (2017). Accuracy assessment of landform classification approaches on different spatial scales for the Iranian loess plateau. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 6*(11), 1–22. <https://doi.org/10.3390/ijgi6110366>
- Kringer, K., Tusch, M., Geitner, C., Rutzinger, M., Wiegand, C., & Meißl, G. (2009). Geomorphometric analyses of LiDAR digital terrain models as input for digital soil mapping. *Proceedings of Geomorphometry 2009* (pp. 74–81). University of Zurich.
- Luo, W., & Stepinski, T. F. (2008). Identification of geologic contrast from landscape dissection pattern: An application to the Cascade Range, Oregon, USA. *Geomorphology, 99*(1–4), 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.10.014>
- MacMillan, R. A., Pettapiece, W. W., Nolan, S. C., & Goddard, T. W. (2000). A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. *Fuzzy Sets and Systems, 113*(1), 81–109. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(99\)00014-7](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(99)00014-7)
- MacMillan, R. A., Martin, T. C., & Earle, T. J. (2003). Automated analysis and classification of landforms using high-resolution digital elevation data: Applications and issues. *Canadian Journal of Remote Sensing, 29*(5), 592–606. <https://doi.org/10.5589/m03-031>
- MacMillan, R. A., & Shary, P. A. (2009). Landforms and landform elements in geomorphometry. In T. Hengl & H. I. Reuter (Eds.) *Geomorphometry: Concepts, software, applications* (pp. 227–254). Amsterdam: Elsevier
- Mark, D. M. (1975). Geomorphometric parameters: A review and evaluation. *Geografiska Annaler Series A, Physical Geography, 57*(3–4), 165–177.
- Martins, F. M. G., Fernandez, H. M., Isidoro, J. M. G. P., Jordán, A., & Zavala, L. (2016). Classification of landforms in Southern Portugal (Ria Formosa Basin). *Journal of Maps, 12*(3), 422–430. <https://doi.org/10.1080/17445647.2015.1035346>
- Mashimbye, Z. E., De Clercq, W. P., & Van Niekerk, A. (2014). An evaluation of digital elevation models (DEMs) for delineating land components. *Geoderma, 213*, 312–319. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.023>

- Miller, B. A., & Schaetzl, R. J. (2015). Digital classification of hillslope position. *Soil Science Society of America Journal*, 79(1), 132–145. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.07.0287>
- Milne, J. D. G., Clayden, B., Singleton, P. L., & Wilson, A. D. (1995). *Soil description handbook*. Landcare, AU: Manaaki Whenua Press.
- Minar, J., & Evans, I. S. (2008). Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. *Geomorphology*, 95(3–4), 236–259. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.06.003>
- Moravej, K., Karimian Eghbal, M., Toomanian, N., & Shahla Mahmoodi, S. (2012). Comparison of automated and manual landform delineation in semi detailed soil survey procedure. *African Journal of Agricultural Research*, 17(7), 2592–2600. <https://doi.org/10.5897/AJAR11.728>.
- Morgan, J. M., & Lesh, A. (2005). Developing landform maps using ESRI's model builder. *Proceedings of the 2005 ESRI International User Conference*, (pp. 25–29). USA.
- Norini, G., Zuluaga, M. C., Ortiz, I. J., Aquino, D. T., & Lagmay, A. M. F. (2016). Delineation of alluvial fans from digital elevation models with a GIS algorithm for the geomorphological mapping of the Earth and Mars. *Geomorphology*, 273(15), 134–149. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.08.010>
- O'Callaghan, J. F., & Mark, D. M. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28(3), 323–344. [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(84\)80011-0](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0)
- Pennock, D. J., Zebarth, B. J., & DeJong, E. (1987). Landform classification and soil distribution in hummocky terrain, Saskatchewan, Canada. *Geoderma*, 40(3–4), 297–315. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(87\)90040-1](https://doi.org/10.1016/0016-7061(87)90040-1)
- Peucker, D., & Douglas, H. (1975). Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data. *Computer Graphics and Image Processing*, 4(4), 375–387. [https://doi.org/10.1016/0146-664X\(75\)90005-2](https://doi.org/10.1016/0146-664X(75)90005-2)
- Pike, R. J. (1988). The geometric signature: Quantifying landslide-terrain types from digital elevation models. *Mathematical Geology*, 20(5), 491–511.
- Pelfini, M., & Bollati, I. (2014). Landforms and geomorphosites ongoing changes: Concepts and implications for geoheritage promotion. *Quaestiones Geographicae*, 33(1), 131–143. <https://doi.org/10.2478/quageo-2014-0009>
- Piloyan, A., & Konečný, M. (2017). Semi-automated classification of landform elements in Armenia based on SRTM DEM using k-means unsupervised classification. *Quaestiones Geographicae*, 36(1), 93–103. <https://doi.org/10.1515/quageo-2017-0007>
- Prima, O. D. A., Echigo, A., Yokoyama, R., & Yoshida, T. (2006). Supervised landform classification of Northeast Honshu from DEM-derived thematic maps. *Geomorphology*, 78(3–4), 373–386. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.02.005>
- Romstad, B. (2001). Improving relief classification with contextual merging. In J. T. Björke & H. Tveite (Eds.) *Proceedings of the 8th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Science* (pp. 3–14).
- Romstad, B., & Etzelmüller, B. (2012). Mean-curvature watersheds: a simple method for segmentation of a digital elevation model into terrain units. *Geomorphology*, 139–140, 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.10.031>
- Ruhe, R. V. (1960). Elements of the soil landscape. In *Transactions of the 9th Congress of the International Society of Soil Science* (pp. 165–170). Madison, Wisconsin: International Soil Science Society.
- Schmidt, J., & Hewitt, A. (2004). Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position. *Geoderma* 121(3–4), 243–256. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.10.008>
- Seijmonsbergen, A. C., Hengl, T., & Anders, N. S. (2011). Semi-automated identification and extraction of geomorphological features using digital elevation data. In M. J. Smith, P. Paron, & J. S. Griffiths (Eds.), *Geomorphological mapping* (pp. 297–335). Amsterdam, NLD: Elsevier.
- Shary, P. A. (1995). Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures. *Mathematical Geology*, 27(3), 373–390.
- Shary, P. A., Sharaya, L. S., Mitusov, A. V. (2002). Fundamental quantitative methods of land surface analysis, *Geoderma*, 107(1–2), 1–32. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00136-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00136-7)
- Skidmore, A. K. (1990). Terrain position as mapped from a gridded digital elevation model. *International Journal of Geographical Information Systems*, 4(1), 33–49. <https://doi.org/10.1080/02693799008941527>
- Speight, J. G. (1974). A parametric approach to landform regions. In *Progress in geomorphology* (pp. 213–230). Oxford, UK: Alden Press.
- Speight, J. G. (1990). Landform. In R. C. McDonald, R. F. Isbell, J. G. Speight, J. Walker, & M. S. Hopkins (Eds.), *Australian Soil and Land Survey field handbook* (pp. 9–57). Melbourne: Inkata Press.
- Stepinski, T. F., & Bagaria, C. (2009). Segmentation-based unsupervised terrain classification for generation of physiographic maps. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 6(4), 733–737. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2009.2024333>
- Tarboton, D. G., & Ames, D. P. (2001, May). *Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data*. World Water and Environmental Resources Congress, Orlando, Florida
- Tunçay, T., Bayramin, İ., Öztürk, H. S., Kibar, M., & Başkan, O. (2014). The use of remote sensing and geographic information system techniques to determine relationships between land use and landform. *Toprak Su Dergisi*, 3(2), 124–136.
- van Asselen, S., Seijmonsbergen, A. C. (2006). Expert-driven semi-automated geomorphological mapping for a mountainous area using a laser DEM. *Geomorphology*, 78(3–4), 1309–1320. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.01.037>
- Ventura, S. J., & Irvin, B. J. (2000). Automated landform classification methods for soil landscape studies. In J. P. Wilson & J. C. Gallant (Eds.), *Terrain analysis principals and applications* (pp. 245–294). New York, NY: John Wiley & Sons.

- Verhagen, P., Dragut, L. (2012). Object-based landform delineation and classification from DEMs for archaeological predictive mapping. *Journal of Archaeological Science*, 39(3), 698–703. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.11.001>
- Weiss, A. (2001). *Topographic Position and Landforms Analysis*. ESRI User Conference. San Diego, CA
- Wysocki, D. A., Schoeneberger, P. J., & LaGarry, H. E. (2000). Geomorphology of soil landscapes. In P. M. Huang, Y. Li, & M. E. Sumner (Eds.), *Handbook of soil sciences: Properties and processes* (pp. 5–40). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Zevenbergen, L. W., & Thorne, C. R. (1987). Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 47–56. <https://doi.org/10.1002/esp.3290120107>
- Zhao, W. F., Xiong, L. Y., Ding, H., & Tang, G. (2017). Automatic recognition of loess landforms using Random Forest Method. *Journal of Mountain Science*, 14(5), 885–897. <https://doi.org/10.1007/s11629-016-4320-9>
- Wood, J. (1996). *The geomorphological characterisation of digital elevation models* (Doctoral dissertation, University of Leicester, England). Retrieved from <https://lra.le.ac.uk/handle/2381/34503>