

Morfolojik İşleme ile Sonar Ark Haritalarından Yüzey Profillerinin Çıkarımı *

Billur Barshan ve Deniz Başkent
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Bilkent Üniversitesi
06533, Bilkent, Ankara
billur@ee.bilkent.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada birden fazla uzaklık ölçerden alınan verilerin morfolojik yöntemlerle işlenerek yüzey profillerinin çıkarımı incelenmektedir. Kullanılan yöntem, sayısı ve yapısı değişken algılayıcı düzeneklerine ve sentetik dizilimlere uygulanabilmesi bakımından esnek olup hatalı ve çapraz ölçümleri, ileri-dereceli yansımaları büyük ölçüde azalttığı ve çoklu yansımaları da değerlendirebildiği için dayanıklı bir yapıya sahiptir. Yöntemin başarımı, yüzeyin yapısı ve uzaklığı, duyucu hüzme açıklığı, ölçüm gürültüsü gibi değişkenlere göre incelenmiştir. Çalışmanın temel fikri, farklı ölçekteki bir-birinden çok farklı alanlara da uygulanabilir.

1 Giriş

Bu çalışmada açık arazide, madenlerde ve sualtında sıkça rastlanan eğimi değişken yüzeylerin profillerinin kestirimi için geliştirilen yeni bir yöntem sunulmaktadır. Bu yöntemde akustik duyuculara has olan açısal belirsizlik, elde edilen verilerin ark haritasına dönüştürülerek morfolojik yöntemlerle işlenmesi sonucu etkin bir biçimde ortadan kaldırılmış, hassas bir yüzey profil çıkarımı sağlanmıştır. Bu yaklaşım doğrusal olmayan bir sinyal geriçatma yöntemi olarak da değerlendirilebilir. Yöntem, sayısı ve yapısı değişken algılayıcı düzeneklerine ve sentetik dizilimlere uygulanabilmesi bakımından gerekli esnek ve dayanıklı yapıya sahiptir. Daha önceki pek çok çalışma, köşe, duvar, kenar, silindir gibi yapısı iyi bilinen nesnelere sınırlı kalmıştır [1, 3, 4, 6]. Ayrıca bu yaklaşım hatalı ve çapraz ölçümleri, ileri-dereceli yansımaları eleyerek büyük ölçüde azaltması ve çoklu yansımaları değerlendirebilmesi açısından da avantajlıdır.

Yüzeye gidiş-geliş uçuş süresini ölçen uzaklık algılayıcılardan oluşan bir ölçüm sistemi ile ölçülen uçuş süresi t_o ve ortamdaki iletim hızı c ise, uzaklık değeri $r = ct_o/2$ denkleminde bulunabilir. Bilindiği gibi akustik duyucular tek başlarına kullanıldıklarında uçuş süresine dayalı hassas uzaklık bilgisi sağlayabilmelerine rağmen, yansıma sinyalinin geliş yönünü hüzme açıklığından daha iyi bir çözünürlükle belirleyemezler. Bu durumda sık karşılaşılan bir yaklaşım geniş hüzme açıklığını cihazın bir sınırlaması olarak kabullenip yansıma noktasının bakış doğrultusunda yer aldığını varsayarak bu doğru üzerinde, ölçülen uzaklığa bir işaret koymaktır. Bizim yöntemimizde ise açısal belirsizlik bilgisi de değerlendirilerek bunu temsil eden dairesel ve eliptik arklar çizilmektedir. Aynı duyucunun gönderici/alıcı olarak kullanılması durumunda cismin yarıçapı r ve genişliği yaklaşık hüzme açıklığı kadar olan bir dairesel ark üzerinde yer aldığı bilinir (Şekil 1(a)). Gönderici ve alıcı farklı cihazlar ise, yansıma noktası, odak noktaları gönderici ve alıcının bulunduğu konumlara karşılık gelen bir eliptik ark üzerine düşer (Şekil 1(b)). Her iki durumda da arklar yüzeye yansıma noktalarında teğettirler. Buna benzer çok sayıda arkın çizimi sonucu ark haritasında koyulaşan kısımların işlenmesiyle hüzme açıklığının çok ötesinde açısal çözünürlük elde edilebilir.

*Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 197E051, EEEAG-92 ve EEEAG-116 projeleri kapsamında desteklenmiştir.

2 Morfolojik İşleme ile Profil Çıkarımı

Çalışmada birden fazla akustik alıcı/verici kullanılmış, bunlar ortama çeşitli düzeneklerle (doğrusal, dairesel, rastgele, veya sentetik dizilimler şeklinde) yerleştirilmişlerdir. Her duyucu hem alıcı hem de verici olarak kullanılabilmekte ve bir duyucu verici olarak çalıştırıldığında kendisi dahil tüm duyucular-daki uçuş süresi bilgisi kaydedilmektedir. Açısal belirsizliği temsil eden arklar 500×500 boyutlarında *ark haritası* adı verilen bir matrise ikili olarak yazılmaktadır. Aynı gönderimde yüzey üzerinde birden fazla noktadan yansıma alınabilir (çoklu yansıma) veya sinyal bir kaç kez farklı yüzeylerden yansıdıktan sonra alıcıya geri dönebilir (ileri-dereceli yansıma).

Örnek olarak Şekil 2(a)'da orijinal yüzey profili ve alıcı-verici düzeneği, Şekil 2(b)'de ise elde edilen ark haritası görülmektedir. Ark haritasına bakarak koyulaşan kısımlardan Şekil 2(a)'daki yüzey profilinin neredeyse gözle görülebildiği ortaya çıkmaktadır. Çizilen her arkın yüzeye en az bir noktada teğet olması ve yüzey üzerinde gerçekten yansıma olan noktalara yakın yerlerde birden fazla arkın kesişmesi beklenir. Bu şekilde kesişmelerin sayısı yeterince çoğaldığında yüzeyi kaplayarak Şekil 2(b)'deki koyulukları oluşturduğu gözlenmiştir. Arkların yansıma noktalarına karşılık gelmeyen ve açısal belirsizliği temsil eden geri kalan kısımları ise daha seyrek ve açık renk olarak kalmaktadır. Benzer şekilde, hatalı ve çapraz ölçümlere, ileri-dereceli yansımalara ve gürültüden kaynaklanan hatalı yansımalara karşılık gelen arklar da oldukça seyrek kalır. Sonuç olarak elde edilen ark haritasında yer alan çıkıntı, kuyruk, ve seyrek arkları yok ederek yüzey profilini çıkarmak için erozyon, genişletme, inceltme gibi imge işlemede yaygın olarak kullanılan morfolojik işleme yöntemleri kullanılmıştır [4, 5, 8]. İmge işlemede bu operatörler çoğunlukla ikili imgelere veya uzaklık bilgisini kodlayan gri-ölçekli imgelere uygulanmıştır [8]. Bizim yaklaşımımızın en büyük farkı morfolojik işlemenin uzaklık bilgisini ve açısal belirsizlikleri temsil eden ark haritalarına uygulanması ve bu açıdan yeni olmasıdır.

Morfolojik operatörler imgeler üzerinde basit işlemler sonucu değişiklik yaparlar. Örneğin *erozyon* operatörü, değeri 1 olan bir pikselin çevresindeki sekiz pikselin de değeri 1 ise o pikseli 1 olarak bırakır. Eğer bir tanesi bile 1 değilse, ortadaki pikselin değerini 0 yapar. *İnceltme* işlemi ise erozyonun genelleştirilmiş hali olup değeri 1 olması gereken komşu piksel sayısı n , 1 ile 8 arasında değişen değerler alabilir. Burada n bir pikselin komşularının desteğine ne kadar önem verildiğinin ölçüsü olan bir parametredir. Dolayısıyla *budama* ve *erozyon* işlemleri *inceltme* işleminin $n = 1$ ve $n = 8$ için iki uç durumuna karşılık gelir.

Şekil 2'de verilen örnek üzerinde $n = 6$ parametrelili inceltme işleminin sonucu şeklin (c) kısmında görülmektedir. Yüzeyi daha kompakt bir değişken seti ile temsil edilebilmek amacıyla morfolojik işleme sonucu elde edilen noktalardan en küçük hatalar karesini veren bir polinom geçirilmiştir. Uyarlanan polinomun orijinal yüzey profili ile karşılaştırılması Şekil 2(d)'de görülebilir.

Farklı işleme yöntemlerinin başarımlarını karşılaştırmak için mutlak ve göreceli hata kriterleri geliştirilmiştir. Bunlardan bir tanesi olan $\mathcal{E} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [p(x_i) - y(x_i)]^2}$, polinom ile esas yüzey arasındaki hatanın etkin değerini verir. Burada N ark haritasındaki toplam sütun sayısı, $p(x_i)$ polinomun örnekleri, ve $\sigma_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y(x_i) - \frac{1}{N} \sum_i y(x_i)]^2$ ise esas yüzey profili olan $y(x_i)$ 'nin değişintisidir. Çeşitli morfolojik işleyicilerin Şekil 2(b) üzerinde verdiği sonuçlar Tablo 1'de özetlenmiştir.

İlk aşamada farklı duyucu düzenekleri, yüzey profilleri ve morfolojik işleme yöntemleri ile çok sayıda benzetim çalışması yapılmıştır [2]. Düzenli yapıdaki dizilimler matematiksel analiz kolaylığı açısından çoğunlukla tercih edilmesine rağmen yapısı rastgele veya düzensiz olan dizilimler algılayıcı konumlarının birbirini tamamlayıcı nitelikte olması nedeniyle daha iyi sonuç vermiştir.

İkinci aşamada Nomad 200 robotu üzerinde Polaroid duyucularından oluşan dairesel düzenek kullanılarak deneysel çalışmalar da yapılmıştır. Hem ayna gibi dalga boyuna göre pürüzsüz sayılan, hem de farklı derecede pürüzleri olan yüzeyler incelenmiştir. Şekil 3'de verilen deneysel örnek için diğer sonuçlar Tablo 2'de özetlenmiştir [2]. Pürüzlü yüzeylerde hatanın pürüz miktarı ile arttığı, ancak kabul edilebilir düzeyde olduğu gözlenmiştir.

3 Yöntemin Başarımı

Her ne kadar kullanılan yöntem, eğimi rastgele değişen yüzeylere uygulanabilir olsa da yöntemin başarımını incelemek için bununla ilgili çalışmalarımızı parametreleri sistematik olarak değiştirilebilen sinuzoidal yapıdaki yüzeylere yoğunlaştırdık. Şekil 4(a)'da gösterilen genlik, periyod, ve uzaklık gibi değişkenler ile hüzme açıklığı ve ölçüm gürültüsünü değiştirerek yapılan benzetim çalışmalarında hatanın bu değişkenlerle olan ilişkisi incelendi. Şekilde gösterilen ve parametreleri $A = 30$, $T = 125$, ve $L = 200$ piksel olan sinuzoidal yüzey referans olarak alındı ve parametreler bu değerler etrafında değiştirildi. Bu düzenekteki dizilim elemanları $y = 0$ 'dan ortalama uzaklığı 32.7 piksel olmak üzere $[-35, 440] \times [0, 90]$ 'lık bir kutu içinde dağıtılmıştır. Elde edilen ark haritası aynı şeklin (b) kısmında, $n = 3$ inceltme işlemi sonucu (c) kısmında, polinom uyarılama sonucu (d) kısmında verilmiştir. Diğer morfolojik işlemlerin sonuçları ise Tablo 3'te özetlenmiştir.

Yüzeyin periyodu diğer değişkenler sabit tutularak değiştirildiğinde \mathcal{E} 'nin periyod küçüldükçe, özellikle $T = 100$ pikselden küçük değerler için hızla arttığı görüldü (Şekil 5(a)). Yüzeyin en küçük eğim yarıçapı R_{\min} küçüldükçe profil çıkarımının zorlaşması ve hataların artması beklenir. R_{\min} 'in sinuzoidin periyoduna göre değişimi Şekil 5(b)'de verilmiştir. Benzer şekilde yüzeyin genliği artırıldığında \mathcal{E} 'nin de arttığı gözlenmiştir (Şekil 5(c)). R_{\min} 'in genliğe göre grafiği ise Şekil 5(d)'de verilmiştir.

Hata ve eğim arasındaki ilişkiyi daha açık bir şekilde ortaya çıkarmak için Şekil 5(b) ve (d)'teki sonuçlar yeniden düzenlenerek \mathcal{E} 'nin R_{\min} 'e göre grafiği Şekil 6(a)'da gösterilmiştir. Düz çizgi ile birleştirilmiş noktalar Şekil 5(a) ve (b)'den T 'nin yok edilmesi ile, kesikli çizgi ile birleştirilmiş üçgenler ise Şekil 5(c) ve (d)'den A 'nın yok edilmesi ile elde edilmiştir. Beklendiği gibi eğimin azalması (veya R_{\min} 'in artması) \mathcal{E} 'nin artmasına neden olmaktadır.

Yüzeyin uzaklığı $L = 200$ piksel etrafında değiştirildiğinde \mathcal{E} 'nin L ile arttığı gözlendi (Şekil 6(b)). Bu şekille ilgili ek sonuçlar Tablo 4'de verilmiştir. Bu tabloda her uzaklık değeri için en küçük hatayı veren morfolojik işlem sonucu gösterilmiştir. Yüzeyden uzaklaştıkça yansıma noktalarının açısız belirsizliğini temsil eden arkların uzunluğu ve dolayısıyla sonuçtaki hata artmaktadır. Yüzeye yaklaştıkça ise arklar kısalarak sayıca da azalır ve yüzeyin tümüyle kaplanması zorlaşır.

Bir diğer önemli değişken olan hüzme açıklığının artırılması ile arkların sayısı, uzunluğu ve dolayısıyla açısız belirsizlik de artmaktadır. Bu durumda giderek daha yüksek dereceli inceltme işlemleri kullanılmasına rağmen hatanın 30° 'den sonra giderek artmakta olduğu gözlenmektedir (Şekil 6(c)). Verilen örnekte en iyi sonuçlar 30° etrafında elde edilmiştir. Hüzme açıklığı küçültüldüğünde ise uzaklığın küçülmesi durumuna benzer şekilde arklar kısalarak sayıca da azalır, nokta sayısının azalmasından kaynaklanan hafif bir hata artışı gözlenir. Bu durumda, özellikle 15° 'nin altındaki değerler için hiçbir morfolojik işlem yapmadan mevcut noktalardan polinom geçirmekle en iyi sonuç elde edilmiştir. Hüzme açıklığı ile ilgili diğer sonuçlar Tablo 4'de özetlenmiştir.

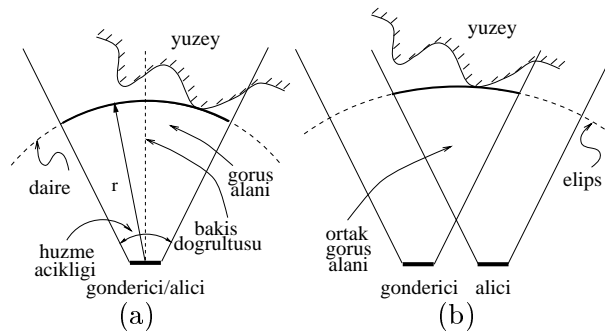
Son olarak da piksel büyüklüğünün seçimi ve ölçümlerdeki hataların etkisini inceleyeceğiz. Bu tür sistemlerde uçuş süresi ölçümündeki çözünürlük, kullanılan dalgaboyu, ortamdaki akustik gürültü miktarı ve alıcı/verici devrelerindeki ısıl gürültü düzeyi gibi etkenlere bağlıdır. Bu durumda piksel büyüklüğünü bu etkenlerin belirlediği çözünürlükten daha küçük seçmek anlamlı olmaz. Ancak sistemin özellikleri önceden bilinemeyebileceği için bu çalışmada belirsizliğin piksel boyutlarından hem büyük hem de küçük olduğu durumlar incelenmiştir. Uçuş süresi değerlerine, ortalaması sıfır olan Gauss dağılımlı beyaz gürültü eklenerek gürültü standart sapması σ_n geniş bir aralığı kaplayabilmek amacıyla logaritmik olarak değiştirilmiştir (Şekil 6(d)). Beklendiği gibi σ_n 'in bir pikselden küçük olduğu durumlarda başarımlar gürültüsüz duruma aşağı yukarı aynıdır. Buna karşılık, σ_n bir pikseli geçtiğinde hata artmaya başlamaktadır. Yöntemin başarımı arkların birbirlerini kuvvetlendirilmesine dayandığı için yüksek miktarda gürültünün arkları yerlerinden kaydırarak bir kısmının morfolojik işleme sonucu yok edilmesi nedeniyle sonuçtaki hatanın artması beklenir. Ancak, böyle olmasına rağmen hatanın beklediği kadar hızlı artmadığı ve yöntemin ölçüm hatalarına karşı oldukça dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 6(d)'ye bakıldığında başarımın yaklaşık $\sigma_n = 10$ piksele kadar gürültüsüz durumdakine benzer olduğu sonucu çıkarılabilir.

4 Sonuç

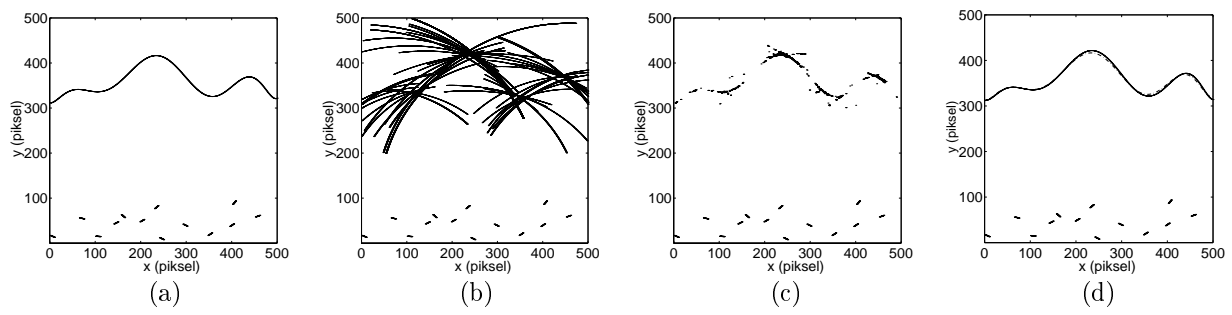
Bu çalışmada eğimi değişken yüzeylerin profil çıkarımı için geliştirilen yeni bir yöntem sunulmuştur. Kullanılan yöntem basit olmasının yanısıra sayısı ve yapısı değişken algılayıcı düzeneklerine ve sentetik dizilemlere uygulanabilmesi bakımından gerekli esnek ve dayanıklı yapıya da sahiptir. Akustik duyuculara has olan açısal belirsizlik, elde edilen verilerin ark haritasına dönüştürülerek morfolojik yöntemlerle işlenmesi sonucu etkin bir biçimde ortadan kaldırılmış, kuvvetlendirilmiş olan özneliklerden yüzeyin profili doğruluk payı yüksek bir biçimde belirlenmiştir. Ayrıca bu yöntem hatalı ve çapraz ölçümleri, ileri-dereceli yansımaları büyük ölçüde azalttığı ve çoklu yansımaları da değerlendirebildiği için dayanıklıdır. Yöntemin başarımı, yüzeyin yapısı ve uzaklığı, hüzme açıklığı, ölçüm gürültüsü gibi değişkenlere göre incelenmiştir. Profil çıkarımındaki hata miktarı kullanılan duyucu sayısı ve düzeneğe bağlı olup eğim yarıçapının çok küçük olduğu yerler hariç birkaç pikseli geçmemektedir. Morfolojik işlemler C programlama dili ile 200 MHz Pentium Pro PC bilgisayar üzerinde denenmiş ve işlem süresinin saniyeden küçük mertebelerde olduğu görülmüştür [2]. Bu çalışmanın temel fikri olan birden fazla uzaklık ölçerden elde edilen verilerin morfolojik yöntemlerle işlenmesi sadece akustik duyucular için değil düşük açısal çözünürlükle uzaklık ölçümünün söz konusu olduğu radar, sonar, robotbilim, optik algılama ve metroloji, uzaktan algılama, jeofiziksel uygulamalar, okyanus yüzeyi incelemeleri, akustik mikroskopi gibi birbirinden oldukça farklı ölçekte ve yapıdaki alanlara da uygulanabilir. Çalışma üç boyuta [7] ve polar koordinatlara da genişletilebilir.

Kaynakça

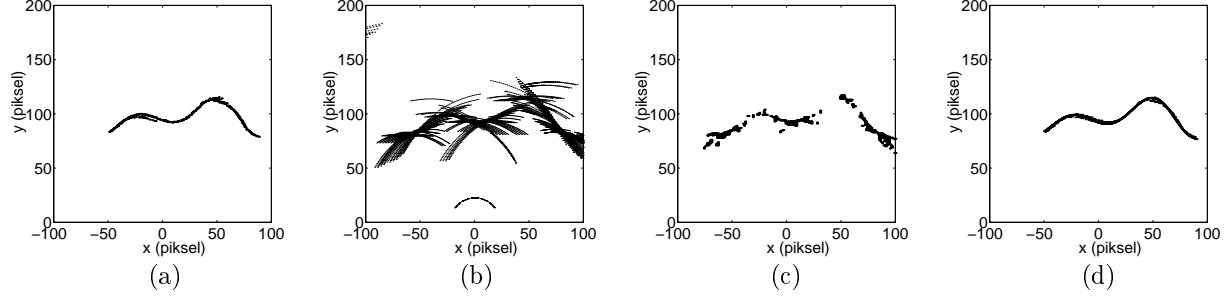
- [1] B. Barshan ve R. Kuc. Differentiating sonar reflections from corners and planes by employing an intelligent sensor. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12(6):560–569, June 1990.
- [2] D. Başkent ve B. Barshan. Surface profile determination from multiple sonar data using morphological processing. *Int. J. of Robotics Research*, 2000'de yayınlanacak.
- [3] M. K. Brown. The extraction of curved surface features with generic range sensors. *Int. J. of Robotics Research*, 5(1):3–18, Bahar 1986.
- [4] C. S. Chen, Y. P. Hung, ve J. L. Wu. Extraction of corner-edge-surface structure from range images using mathematical morphology. *IEICE Trans. on Information and Systems*, E78D(12):1636–1641, 1995.
- [5] E. R. Dougherty. *An Introduction to Morphological Image Processing*. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA, U.S.A., 1992.
- [6] L. Kleeman ve R. Kuc. Mobile robot sonar for target localization and classification. *Int. J. of Robotics Research*, 14(4):295–318, Ağustos 1995.
- [7] K. Preston. 3-dimensional mathematical morphology. *Image and Vision Computing*, 9(5):285–295, 1991.
- [8] J. G. Verly ve R. L. Delanoy. Some principles and applications of adaptive mathematical morphology for range imagery. *Opt. Eng.*, 32(12):3295–3306, 1993.



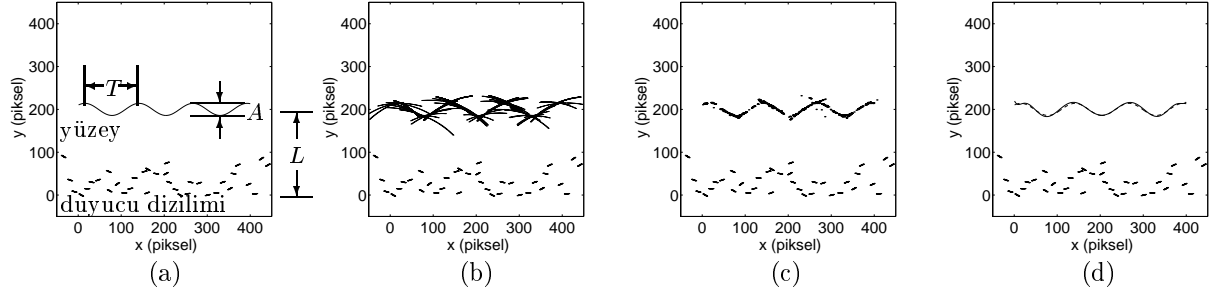
Şekil 1: Gönderici ve alıcının (a) aynı (b) ayrı cihazlar olduğu durumlar.



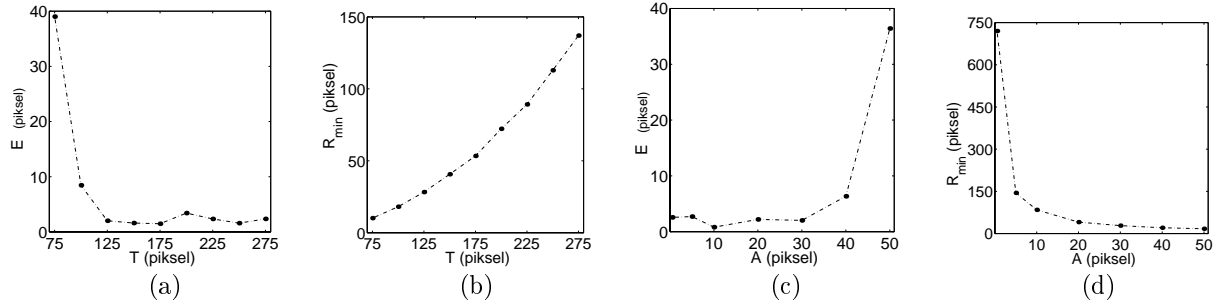
Şekil 2: (a) Orijinal yüzey profili ve duyucu düzeneği, (b) her biri 45° hüzme açıklığı olan 17 duyucu ile elde edilen ark haritası, (c) $n = 6$ parametrelili inceltme işlemi sonucu, (d) polinom (düz çizgi) ve orijinal yüzey profili (kesikli çizgi).



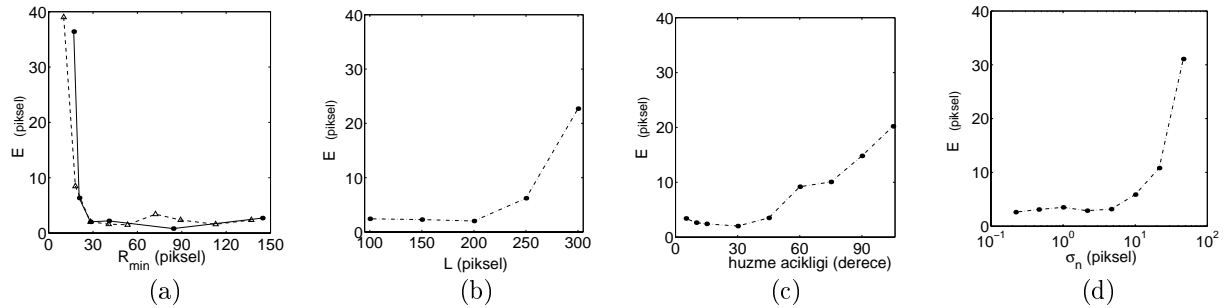
Şekil 3: (a) Orijinal yüzey profili, (b) ark haritası ve duyucu düzeneği, (c) erozyon ($n = 8$) ve budama ($n = 1$) işlemleri sonucu, (d) polinom (düz çizgi) ve orijinal yüzey profili (kesikli çizgi).



Şekil 4: (a) Orijinal yüzey profili ile A, T , ve L değişkenleri, (b) her biri 30° hüzme açıklığı olan 35 duyucu ile elde edilen ark haritası, (c) $n = 3$ parametrelili inceltme işlemi sonucu, (d) polinom (düz çizgi) ve orijinal yüzey profili (kesikli çizgi).



Şekil 5: (a) \mathcal{E} ve T , (b) R_{\min} ve T , (c) \mathcal{E} ve A , (d) R_{\min} ve A .



Şekil 6: (a) \mathcal{E} ve R_{\min} , (b) \mathcal{E} ve L , (c) \mathcal{E} ve hüzme açıklığı, (d) \mathcal{E} ve σ_n .

morfolojik işlem	\mathcal{E} (piksel)	t_{CPU} (s)
inceltme ($n = 1$: budama)	20.59	1.21
inceltme ($n = 3$)	12.53	1.07
inceltme ($n = 5$)	9.19	0.99
inceltme ($n = 6$)	2.75	0.98
inceltme ($n = 7$)	5.29	0.97
inceltme ($n = 8$: erozyon)	11.75	0.96
kapatma & erozyon	11.50	5.64

Tablo 1: Şekil 2(b) üzerinde çeşitli morfolojik işlemlerin sonuçları.

morfolojik işlem	\mathcal{E} (piksel)	t_{CPU} (s)
inceltme ($n = 1$: budama)	4.98	0.41
inceltme ($n = 2$)	4.84	0.41
inceltme ($n = 3$)	4.07	0.40
inceltme ($n = 4$)	3.28	0.39
inceltme ($n = 5$)	2.58	0.37
inceltme ($n = 6$)	1.96	0.36
inceltme ($n = 7$)	1.63	0.35
inceltme ($n = 8$: erozyon)	1.42	0.34
erozyon & budama ($n = 1$)	1.41	0.39
erozyon & inceltme ($n = 2$)	1.50	0.39

Tablo 2: Şekil 3(b) üzerinde çeşitli morfolojik işlemlerin sonuçları.

morfolojik işlem	\mathcal{E} (piksel)	t_{CPU} (s)
inceltme ($n = 1$: budama)	2.41	0.29
inceltme ($n = 2$)	2.21	0.28
inceltme ($n = 3$)	2.03	0.27
inceltme ($n = 4$)	2.09	0.27
inceltme ($n = 5$)	2.46	0.26
kapatma & budama ($n = 1$)	2.61	4.59
kapatma & inceltme ($n = 3$)	3.02	4.57
kapatma & erozyon ($n = 8$)	3.63	4.56

Tablo 3: Şekil 4(b) üzerinde çeşitli morfolojik işlemlerin sonuçları.

L (piksel)	morfolojik işlem	\mathcal{E} (piksel)	hüzme açıklığı	morfolojik işlem	\mathcal{E} (piksel)
100	inceltme ($n = 1$)	2.43	5°	—	3.41
150	inceltme ($n = 1$)	2.29	10°	—	2.65
200	inceltme ($n = 3$)	2.03	15°	—	2.43
250	inceltme ($n = 3$)	6.22	30°	inceltme ($n = 3$)	2.03
300	inceltme ($n = 4$)	22.71	45°	inceltme ($n = 5$)	3.51
			60°	inceltme ($n = 5$)	9.19
			75°	inceltme ($n = 6$)	10.07
			90°	inceltme ($n = 7$)	14.82
			105°	inceltme ($n = 8$)	20.21

Tablo 4: Şekil 7 ile ilgili sonuçlar.