

Retinal Kan Damarlarının Bölütlenmesi için İki Boyutlu Karşılaştırma Süzgeci Tepkisi ve Gabor Süzgeci Metodlarının Karşılaştırılması

Comparing 2D Matched Filter Response and Gabor Filter Methods for Vessel Segmentation in Retinal Images

Zafer Yavuz¹, Cemal Köse¹

¹Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Karadeniz Teknik Üniversitesi
zyavuz@ieec.org, ckose@ktu.edu.tr

Özet

Retinal kan damarlarının analizi diyabetik retinopati, hipertansiyon, glukoma ve damar sertliği gibi birçok hastalığın teşhis ve tedavisinde önemlidir. Bu nedenle özellikle kan damarlarının bölütlenmesi bu tür hastalıkların teşhis ve tedavisi için en kritik aşamalardan biridir. Bu çalışmada kan damarlarını daha belirgin hale getirmek için literatürde kullanılan Gabor süzgeci ve 2 boyutlu karşılaştırma süzgeci tepkisi yöntemleri gerçekleştirilmiş ve performans değerleri karşılaştırılmıştır. Uygulamada, önce fundus görüntüler ayrı ayrı Gabor ve 2 boyutlu karşılaştırma süzgecinden geçirilmiş ve kan damarları daha belirgin hale getirilmiştir. Daha sonra kan damarlarının bölütlenmesi için, görüntü Otsu ve en yüksek yüzde (p-tile) yöntemleri kullanılarak siyah-beyaz (ikili) görüntü şekline çevrilmiştir. Bu çevirme işleminde en yüksek yüzde (p-tile) yönteminin daha başarılı olduğu görülmüştür. STARE veritabanında bulunan 20 görüntü kullanılarak Gabor süzgeci için %81.85, 2 boyutlu karşılaştırma süzgeci için ise %71.89'lık ortalama bir doğru tespit oranı elde edilmiştir.

Abstract

Analysis of retinal blood vessels is extremely important for diagnosis and treatment of many diseases such as diabetic retinopathy, hypertension, glukoma, arteriosclerosis etc. Therefore, especially vessel segmentation is one of the most critical steps for detection and treatment of these diseases. In this paper, Gabor filter and 2D matched filter response methods, which are used to enhance blood vessels, were implemented and their performances were compared. Firstly, Gabor filter and 2D matched filter are applied to fundus image in order to enhance the form of blood vessels. Then, the output image is transformed into binary for segmentation of the blood vessels by using Otsu and P-tile thresholding methods. The results show that P-tile thresholding method is more successful at binary transformation. Having been tested on 20 images obtained from STARE database, Gabor filter and 2D matched filter methods have 81.85% and 71.89% of average true positive rate respectively.

1. Giriş

Son yıllarda teknolojiye ilerlemelerle birlikte, tıpta kullanılan bilgisayara dayalı tekniklerin sayısında ve etkinliğinde önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Otomatik

görüntü işleme ve analizi, tıbbi teşhis ve tedavi alanında kullanılan tekniklerdendir. Bu bağlamda yüksek çözünürlüklü retinal fundus görüntüler, göz hastalıklarının otomatik teşhis ve tedavisinde kullanılabilecek birçok özellik sunmaktadırlar. Retinal kan damarları bu özelliklerden en önemlileridir. Şekil 3'te örnek bir retinal fundus görüntü verilmektedir.

Retinal kan damarları, diyabetik retinopati, hipertansiyon ve damar sertliği gibi birçok hastalığın teşhis ve tedavisinde önemlidir. Retinal kan damarları, retina üzerindeki optik disk, makula ve lezyonlar gibi önemli yapıların konumlarını belirlemede kullanılabildiğinden hastalıkların teşhisinde belirteç olarak kullanılabilirler. Burada damar çapı, renk, yansıtıcılık, eğrilik, anormal dallanma gibi ölçümlerin çıkarılması önemlidir. Bu ölçümler hastalık teşhisi, tedavisi ve klinik çalışmalar gibi çeşitli işlemlerde kullanılabilir [1].

Kan damarlarının retinal görüntülerden otomatik olarak bölütlenmesi, kan damarları ve arkaplan arasındaki düşük kontrast, gürültü ve patolojik nedenlerden dolayı oldukça zor bir problemdir. Literatürde bu problemleri çözmek için bir takım yöntemler önerilmiştir.

Damar bölütleme, retinal bir görüntüden kan damarları ile retina arka planın ayırt edilmesine karşılık gelmektedir. Damar bölütleme algoritmaları genel olarak 2 bölümde incelenmektedir [2]. Birinci grup algoritmalar kural tabanlı algoritmalar ve Damar İzleme (Vessel Tracking) [3],[4],[5],[6], Karşılaştırmalı Süzgeç Tepkisi (Matched Filter Response-MFR) [7],[8],[9], Kenar Piksellerinin Gruplanması (Grouping of Edge Pixels) [10], Model Tabanlı Yerel Adaptif Eşikleme (Model-Based Locally Adaptive Thresholding) [11], Topolojik Adaptif Snake (Topology Adaptive Snake) [12] ve Morfoloji Tabanlı yöntemleri [13],[14],[15] kapsamaktadır. İkinci gruptaki algoritmalar ise danışmanlı algoritmalar ve piksel sınıflandırması için genellikle sinir ağı modelleri kullanırlar.

Damar bölütleme konusunda yapılan ilk önemli çalışma Chaudhuri ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Chaudhuri ve arkadaşları çalışmalarında damar bölütlemesi için Gauss fonksiyonu kullanılarak oluşturulan ve damar profiline benzer bir süzgeç önermiştir. Süzgeç girdisi olarak en iyi kontrast sağladığı için Kırmızı-Yeşil-Mavi (KYM) görüntü üzerinde yeşil bileşen kullanılmıştır. Kullanılan filtre 15 derece aralıklarla 12 farklı yönde uygulanmış ve her bir piksel için maksimum değer seçilmiştir. Daha sonra Otsu algoritması kullanılarak damar bölütlemesi gerçekleştirilmiştir [8].

Daha sonraki yıllarda Hoover ve arkadaşları çalışmalarında retinal kan damarlarının bölütlenmesi için yerel ve bölge tabanlı özellikleri birleştirmiştir. Çalışmada kullanılan yöntem, [8] çalışmasında önerilen 2 boyutlu filtre (2D MFR) kullanılmıştır. Daha sonra damar bölütlemesinde kullanılacak uygun eşik değerini bulmak için “*threshold probing*” yöntemi önerilmiştir. Bu teknik MFR görüntüsü üzerinde elde edilen alanların damar ya da damar olmayan bölgeler olarak sınıflandırmaktadır. Yöntem, manuel olarak etiketlenen retinal görüntülerle değerlendirilmiş ve test edilmiştir. Sonuç olarak %75 doğru tespit oranı (True Positive Rate-TPR) elde edilmiştir [7].

Soares J.V.B. ve arkadaşları çalışmalarında piksel parlaklık değerleri üzerinde Gabor-Wavelet dönüşümü uygulamıştır. Daha sonra elde edilen sonuç görüntü Bayesgil Sınıflayıcı tarafından damar ya da damar olmayan bölgelere ayrılır. Bayes sınıflayıcı daha önceden elde edilen manuel bölütlenmiş damar görüntüleri ile eğitilmektedir. Sistem STARE [16] ve DRIVE [2] veritabanları üzerinde test edilmiş ve oldukça iyi sonuçlar elde edildiği bildirilmiştir [17].

Ricci ve arkadaşları damar bölütlemesi için daha önce mamografi görüntüleri için kullanılan doğru operatörü kullanmışlardır. Geliştirdikleri uygulama STARE ve DRIVE veritabanları üzerinde denenmiş ve STARE veri tabanı için %77 ve DRIVE veritabanı için % 90 civarında bir başarı elde etmişlerdir [18].

Shu Yan Lam ve arkadaşları çalışmalarında patolojik retinal görüntüler üzerinde çalışmışlar ve görüntülerdeki damar benzeri yapıları ayırt etmek için Laplace operatörü kullanmışlardır. Daha sonra gürültülü bölgelerin elenmesi için normalize edilmiş gradient vektör alanı kullanılmıştır. STARE veritabanında yapılan performans değerlendirmelerinde % 89 lara varan bir doğru tespit oranı elde edilmiştir [19].

Yine devam eden yıllarda Pourreza ve arkadaşları çalışmalarında renkli retinal görüntülerde damar bölütlemesi için yerel Radon dönüşümü ve morfolojik yapılandırma kullanmışlardır. Bu çalışmada mikroanevrizma (patolojik atardamar) ve hemoraji (kanama) gibi hastalıklara sahip kişilerin görüntüleri kullanıldığında kan damarları ve patolojik yapıların başarılı bir şekilde ayırt edildiği bildirilmiştir [20].

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde retinal kan damarlarının bölütlenmesi için önce damarlar belirginleştirilmekte ve daha sonra özel bir eşikleme yöntemi ile sonuç bölütleme gerçekleştirilmektedir. Damarların belirginleştirilmesi için Gabor süzgeci ve iki boyutlu karşılaştırma süzgeci gibi yöntemler kullanılmaktadır. Damar bölütlemesinde eşikleme yöntemi olarak da Otsu, Adaptive Thresholding, Threshold Probing gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada iki boyutlu karşılaştırma süzgeci ile gabor süzgeci yöntemleri STARE [16] veritabanı üzerinde uygulanmış ve daha sonra en yüksek yüzde ile Otsu eşikleme yöntemleri kullanılarak damar bölütlemesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ve yöntemlerin performansları karşılaştırmalı verilmiştir.

2. İki Boyutlu Karşılaştırma Süzgeci

İki boyutlu karşılaştırma süzgeci (2D Matched Filter), Gauss fonksiyonu kullanılarak oluşturulan ve damar profiline benzer bir süzgeçtir. Süzgeç girdisi olarak en iyi kontrast sağladığı için Kırmızı-Yeşil-Mavi (KYM) görüntüsü üzerinde yeşil bileşen kullanılmıştır. Kullanılan süzgeç 15 derece aralıklarla döndürülerek 12 farklı süzgeç elde edilmiştir. Şekil 1 ve Şekil

2’de 0 derece ve -45 derece için elde edilen süzgeçler verilmektedir.

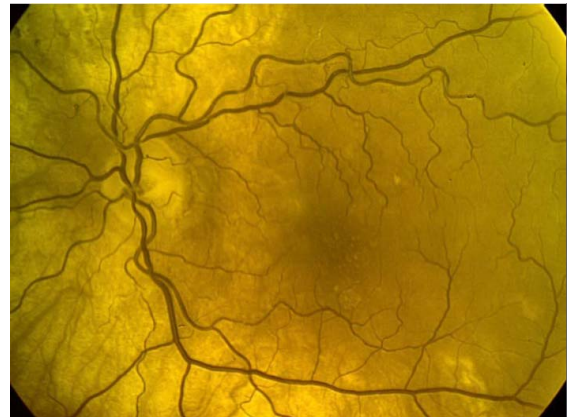
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	4	3	2	1	-2	-5	-6	-5	-2	1	2	3	4	0	0
0	4	3	2	1	-2	-5	-6	-5	-2	1	2	3	4	0	0
0	4	3	2	1	-2	-5	-6	-5	-2	1	2	3	4	0	0
0	4	3	2	1	-2	-5	-6	-5	-2	1	2	3	4	0	0
0	4	3	2	1	-2	-5	-6	-5	-2	1	2	3	4	0	0
0	4	3	2	1	-2	-5	-6	-5	-2	1	2	3	4	0	0
0	4	3	2	1	-2	-5	-6	-5	-2	1	2	3	4	0	0
0	4	3	2	1	-2	-5	-6	-5	-2	1	2	3	4	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Şekil 1: 0 derecede verilen 2 boyutlu karşılaştırma süzgeci

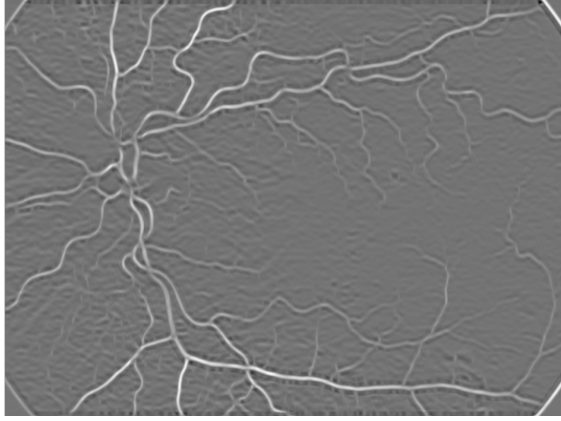
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	4	3	2	1	0	-2	0	-5	0	-6	0	0
0	0	0	4	3	2	1	0	-2	0	-5	0	-6	0	0	0
0	0	4	3	2	1	0	-2	0	-5	0	-6	0	-5	0	0
0	4	3	2	1	0	-2	0	-5	0	-6	0	-5	0	0	0
4	3	2	1	0	-2	0	-5	0	-6	0	-5	0	-2	0	0
3	2	1	0	-2	0	-5	0	-6	0	-5	0	-2	0	0	0
2	1	0	-2	0	-5	0	-6	0	-5	0	-2	0	1	0	0
1	0	-2	0	-5	0	-6	0	-5	0	-2	0	1	2	0	0
0	-2	0	-5	0	-6	0	-5	0	-2	0	1	2	3	0	0
0	0	-5	0	-6	0	-5	0	-2	0	1	2	3	4	0	0
0	-5	0	-6	0	-5	0	-2	0	1	2	3	4	0	0	0
0	0	-6	0	-5	0	-2	0	1	2	3	4	0	0	0	0
0	-6	0	-5	0	-2	0	1	2	3	4	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Şekil 2: -45 derecede verilen 2 boyutlu karşılaştırma filtresi

Elde edilen 12 farklı süzgeç KYM görüntüsünün yeşil bileşeni üzerinde evrişim (katlama) yapılarak 12 farklı katlanmış görüntü elde edilir. Dolayısıyla her bir piksel için 12 farklı değer elde edilmiş olur. Bu değerlerden her bir piksel için maksimum değer seçilmiştir. Elde edilen görüntüde, damarlar daha belirgin ve arkaplanın bastırılmış halde olduğu görülmektedir. Şekil 3’te verilen görüntünün 2 boyutlu karşılaştırma süzgecinin evrişim sonucu Şekil 4’te verilmektedir.



Şekil 3: Retinal fundus görüntü



Şekil 4: Şekil 3'te verilen retinal fundus görüntünün 2 boyutlu karşılaştırma süzgeci çıktısı

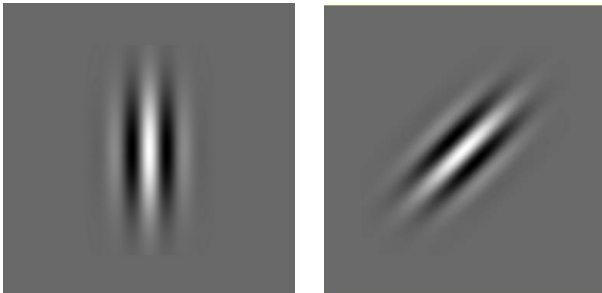
3. Gabor Süzgeci

Gabor süzgeci, görüntü işlemede örüntü tanıma ve özellik çıkarmada yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Gabor çekirdeği, istenen açı ve dalga boyuna ayarlanarak retinal fundus görüntülerdeki kan damarlarının daha belirgin hale gelmesi olabilmektedir. Gabor çekirdeğinin genel denklemi (1)'de verilmiştir.

$$g(x, y; \lambda, \theta, \sigma, \gamma) = \exp\left(-\frac{x'^2 + \gamma^2 y'^2}{2\sigma^2}\right) \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{x'}{\lambda}\right) \quad (1)$$

$$x' = x \cdot \cos\theta + y \cdot \sin\theta \quad y' = -x \cdot \sin\theta + y \cdot \cos\theta$$

Formülde g gabor çekirdeğini göstermektedir. Bu çekirdek 4 parametre tarafından kontrol edilmektedir. θ aranan örüntünün açısını, λ aranan örüntünün dalga boyunu ve γ gabor çekirdeğinin en/boy oranını vermektedir. σ ise aranan örüntünün bant genişliğini temsil etmektedir. σ değeri büyük olduğunda sadece λ ve bu değere çok yakın dalga boylarına sahip örüntüler bulunurken, küçük değerlerde daha geniş bir spektrumda dalga boyu içeren örüntüler bulunur. Şekil 5'te farklı açı ve dalga boylarında verilen örnek gabor çekirdekleri verilmektedir. Gabor çekirdeği istenilen örüntüyü bulacak şekilde ayarlandıktan sonra KYM görüntünün yeşil bileşeni ile evrişime sokularak retinal kan damarlarının belirginleşmesi, diğer kan damarı olmayan bölgelerin ise sönmesi sağlanmış olur.



(a). $\theta = 0^\circ$

(b). $\theta = -45^\circ$

Şekil 5: Farklı açılarda verilen gabor süzgeci. (a)0 derece, (b) -45 derece

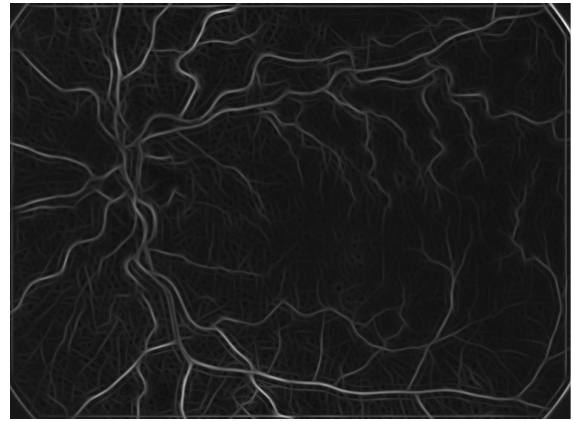
Şekil 5'te verilen gabor süzgeci ile KYM görüntüsünün yeşil bileşeni evriştirilir. Bu durum (2)'de verilmektedir.

$$G = I \otimes g \quad (2)$$

Burada G evrişim sonucunda oluşan görüntüyü, I KYM görüntüsünün yeşil bileşenini, g ise gabor çekirdeğini göstermektedir.

Şekil 5.a'da $\theta = 0$ derece alınarak elde edilen bir gabor çekirdeği verilmektedir. Bu çekirdek 2 boyutlu karşılaştırma süzgecine benzer şekilde 15 derece aralıklarla döndürülerek 12 farklı gabor çekirdeği elde edilir. $\theta = -45$ derece alınarak elde edilen gabor çekirdeği Şekil 5.b'de verilmektedir.

2 boyutlu karşılaştırma süzgecinin farklı açılarda döndürülmesine benzer şekilde, elde edilen 12 farklı gabor çekirdeği RGB görüntüsünün yeşil bileşeni üzerinde evrişim yapılarak 12 farklı katlanmış görüntü elde edilir. Dolayısıyla her bir piksel için 12 farklı değer elde edilmiş olur. Bu değerlerden her bir piksel için maksimum değer seçilmiştir. Elde edilen görüntüde, damarlar daha belirgin ve arkaplanın bastırılmış halde olduğu görülmektedir. Şekil 3'te verilen görüntünün gabor süzgeci çıktısı Şekil 6'da verilmektedir.



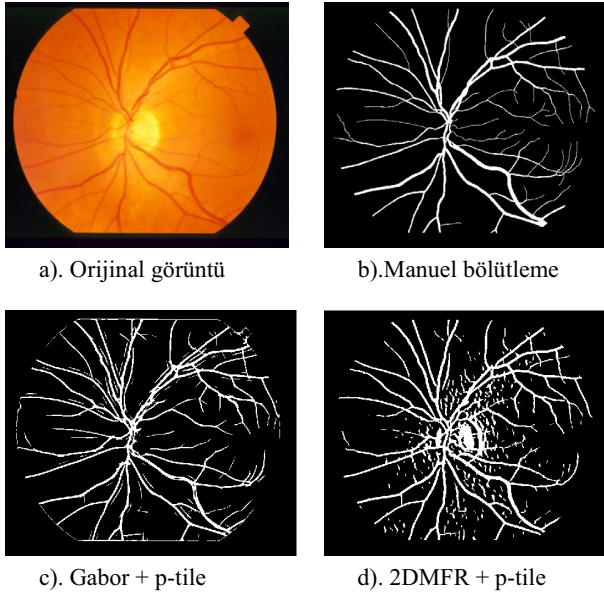
Şekil 6: Gabor süzgeci çıktısı

Gabor çekirdeğinin parametrelerinin ne olacağı kan damarlarının tespiti için çok önemlidir. Retinal kan damarları tespit işlemi için gabor süzgecinin parametreleri şu şekilde olmaktadır: θ açısı farklı gabor süzgeçleri elde etmek için 0 değerinden başlayarak 15 er derece artmaktadır. Retinal kan damarlarının tespiti için kullanılan görüntülerde damar genişliği yaklaşık 4 piksel olduğundan $\lambda = 8$ olarak seçilmiştir. $\sigma = 3$ değeri deneysel olarak en iyi sonucu verdiği görülmektedir. Ayrıca gabor süzgecinin en/boy oranı, damarları en iyi temsil etmesi açısından $\gamma = 0.5$ olarak alınmıştır.

4. Yöntemlerin Karşılaştırılması

Buraya kadar retinal kan damarlarının daha belirgin hale getirilmesi için iki yöntem incelenmiştir. Bu yöntemlerin başarımlarının değerlendirilmesi için elde edilen belirginleştirilmiş görüntülerden retinal kan damarlarının bölütlenmesi gerekir. Bu aşamada Otsu yöntemi ve en yüksek yüzde (p-tile) yöntemi kullanılarak Gabor süzgeci ile 2 boyutlu karşılaştırma süzgeci sonucu elde edilen görüntülerden kan damarları bölütlenmektedir. Bölütleme sonucunda elde edilen siyah-beyaz görüntülerin damar tespitindeki performansları değerlendirilmektedir. Şekil 7'de renkli bir retinal fundus görüntünün Gabor süzgeci ve 2 boyutlu karşılaştırma süzgeci sonuçları verilmektedir. Şekilde

siyah-beyaza dönüşüm için en yüksek yüzde (p-tile) yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 7. Retinal kan damarı bölütleme sonuçları

Performans değerlendirilmesinde internet üzerinde halka açık bir veritabanı olan STARE veri tabanı kullanılmıştır. Bu veritabanında 20 adet retinal fundus görüntü bulunmaktadır. Bu görüntülerden 10 tanesi normal (herhangi bir hastalık olmayan) ve 10 tanesi de anormal (hastalıklı) görüntülerdir. Kan damarı bölütlenmesinin performansını ölçmek için bu görüntülerin manuel olarak bölütlenmiş halleri de bulunmaktadır. Manuel olarak bölütlenmiş görüntülerde tüm görüntünün ortalama %12 si damar olarak işaretlendiğinden en yüksek yüzde (p-tile) yönteminde p değeri 0.12 olarak seçilmiştir.

Sonuç olarak yukarıda bahsedilen iki yöntem kullanılarak bölütlenmiş damar görüntüleri elde edilmiş ve performans ölçümleri yapılmıştır. Gerçekte damar üzerinde olan ve tespit sonucunda da damar olarak işaretlenen piksellerin sayısı *doğru pozitif (dp)*, gerçekte arkaplana ait olan ve tespit sonucunda da arkaplan olarak işaretlenmiş piksel sayısı *doğru negatif (dn)*, gerçekte arkaplana ait olan ancak damar olarak işaretlenen piksellerin sayısı *yanlış pozitif (yp)*, gerçekte damar üzerinde olan ancak tespit sonucunda arkaplan olarak işaretlenen piksellerin sayısı *yanlış negatif (yn)* olarak ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda 3-6 eşitliklerine göre *Doğru Tespit Oranı* (True Positive Rate-TPR ya da Sensivity), *Yanlış Tespit Oranı* (False Positive Rate-FPR), *Özgüllük* (Specifity) ve *Doğruluk* (Accuracy) değerleri hesaplanmıştır.

$$\text{Doğru Tespit Oranı (DTO)} = \frac{DP}{DP+YN} \quad (3)$$

$$\text{Yanlış Tespit Oranı (YTO)} = \frac{YP}{YP+DN} \quad (4)$$

$$\text{Özgüllük} = 1 - YTO \quad (5)$$

$$\text{Doğruluk} = \frac{DP+DN}{DP+DN+YP+YN} \quad (6)$$

STARE veritabanında bulunan 20 görüntüden elde edilen ölçüm sonuçlarının ortalama değerleri Tablo 1'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 1 : Ölçüm Sonuçları

	DTO	YTO	Özgüllük	Doğruluk
Gabor + Otsu	0,1205	0,0256	0,9744	0,9099
Gabor + P-tile	0,8185	0,0780	0,9220	0,9137
2D MFR + Otsu	0,2476	0,0318	0,9682	0,9146
2D MFR + P-tile	0,7189	0,0765	0,9235	0,9085

5. Sonuçlar ve Değerlendirme

Çalışmada retinal kan damarlarının tespiti üzerinde durulmuştur. Bu işlem için önce retinal görüntülerde ön işlem olarak kan damarları belirginleştirilmiş ve daha sonra da damar bölütlemesi için siyah beyaza dönüşüm işlemi gerçekleştirilmiştir. Son olarak damar bölütlemesi için kullanılan yöntemlerin performansları karşılaştırılmıştır.

Uygulamada ön işlem olarak kan damarlarının belirginleştirilmesi işlemi için Gabor süzgeci ve iki boyutlu karşılaştırma süzgeci kullanılmıştır. Bu süzgeçler yapısal olarak bir görüntüdeki damar benzeri yapıları düşük kontrast oranına rağmen belirginleştirmektedir. Bu çalışmada bu süzgeçler STARE veritabanındaki retinal görüntülere ayrı ayrı uygulanmıştır. Süzgeçleme işleminden sonra damar bölütlemesi için belirginleştirilmiş damar görüntüleri siyah-beyaza dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm için Otsu ve en yüksek yüzde (p-tile) eşikleme yöntemleri uygulanmıştır.

Sonuç olarak Tablo 1'den de görüldüğü gibi, retinal kan damarlarının tespiti için Gabor süzgecinin ardından en yüksek yüzde (p-tile) eşikleme yönteminin kullanılmasının diğer yöntemlerden daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. En yüksek yüzde eşikleme yönteminin daha başarılı olmasının nedeni belirginleştirilmiş görüntüde sadece damar benzeri yapıların ön plana çıkarılmasıdır. Ayrıca Gabor ve iki boyutlu karşılaştırma süzgeci karşılaştırıldığında Gabor süzgecinin damar benzeri yapıları daha iyi belirginleştirdiği ve bu nedenle de bu süzgecin iki boyutlu karşılaştırma süzgecine göre nispeten daha yüksek sonuçlar verdiği görülmektedir.

Burada damar bölütlemesi için en iyi sonuç Gabor süzgecinden sonra en yüksek yüzde eşikleme yöntemi uygulandığında elde edilmiştir (%81.85). Bu başarı oranı literatürde elde edilen [7], [8] ve [18] çalışmalarında elde edilen doğru tespit oranlarından daha yüksek ve [17] çalışmasında elde edilen doğru tespit oranına yakındır. Daha iyi sonuçlar elde edebilmek için retinal kan damarlarının belirginleştirilmesinden sonra farklı eşikleme yöntemleri geliştirilebilir. Bu nedenle bu çalışma, gelecek çalışmalar için ümit vericidir.

6. Kaynaklar

- [1] Oral D., Atmaca L.S. "Optik Koherens Tomografi", Türkiye Klinikleri Journal of Ophthalmology Cilt:10, Sayı:1, 2001.
- [2] J. Staal, M. D. Abramoff, M. Niemeijer, M. A. Viergever, and B. V. Ginneken, "Ridge-based vessel segmentation in color images of the retina," IEEE Trans. Med. Imag., vol. 23, no. 4, pp. 501–509, Apr. 2004.
- [3] O. Chutatape, L. Zheng, and S. Krishnan, "Retinal blood vessel detection and tracking by matched Gaussian and

- Kalman filters,” in Proc. IEEE Int. Conf. Eng. Biol. Soc., vol. 20, 1998, pp. 3144–3149.
- [4] Y. A. Tolias and S. M. Panas, “A fuzzy vessel tracking algorithm for retinal images based on fuzzy clustering,” *IEEE Trans. Med. Imag.*, vol. 17, pp. 263–273, Apr. 1998.
- [5] A. Can, H. Shen, J. N. Turner, H. L. Tanenbaum, and B. Roysam, “Rapid automated tracing and feature extraction from retinal fundus images using direct exploratory algorithms,” *IEEE Trans. Inform. Technol. Biomed.*, vol. 3, pp. 125–138, June 1999.
- [6] L. Gagnon, M. Lalonde, M. Beaulieu, and M.-C. Boucher, “Procedure to detect anatomical structures in optical fundus images,” *Proc. SPIE Med. Imaging: Image Processing*, vol. 4322, pp. 1218–1225, 2001.
- [7] A. Hoover, V. Kouznetsova, and M. Goldbaum, “Locating blood vessels in retinal images by piecewise threshold probing of a matched filter response,” *IEEE Trans. Med. Imag.*, vol. 19, pp. 203–210, Mar. 2000.
- [8] S. Chaudhuri, S. Chatterjee, N. Katz, M. Nelson, and M. Goldbaum, “Detection of blood vessels in retinal images using two-dimensional matched filters,” *IEEE Trans. Med. Imag.*, vol. 8, pp. 263–269, Sept. 1989.
- [9] L. Gang, O. Chutatape, and S. M. Krishnan, “Detection and measurement of retinal vessels in fundus images using amplitude modified second-order Gaussian filter,” *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 49, pp. 168–172, Feb. 2002.
- [10] A. Pinz, S. Bernögger, P. Datlinger, and A. Kruger, “Mapping the human retina,” *IEEE Trans. Med. Imag.*, vol. 17, pp. 606–619, Aug. 1998.
- [11] X. Jiang and D. Mojon, “Adaptive local thresholding by verification-based multithreshold probing with application to vessel detection in retinal images,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. 25, pp. 131–137, Jan. 2003.
- [12] T. McInerney and D. Terzopoulos, “T-snakes: Topology adaptive snakes,” *Med. Imag. Anal.*, vol. 4, no. 2, pp. 73–91, 2000.
- [13] M. E. Martínez-Pérez, A. D. Hughes, A. V. Stanton, S. A. Thom, A. A. Bharath, and K. H. Parker, “Scale-space analysis for the characterization of retinal blood vessels,” in *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention—MICCAI’99*, C. Taylor and A. Colchester, Eds. Berlin, Germany : Springer-Verlag, 1999, pp. 90–97. ser. Lecture Notes in Computer Science.
- [14] T. Walter and J. C. Klein, “Segmentation of color fundus images of the human retina: Detection of the optic disc and the vascular tree using morphological techniques,” in *Medical Data Analysis*, J. Crespo, V. Maojo, and F. Martin, Eds. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2001, pp. 282–287. ser. Lecture Notes in Computer Science.
- [15] F. Zana and J. C. Klein, “Segmentation of vessel-like patterns using mathematical morphology and curvature evaluation,” *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 10, no. 7, pp. 1010–1019, 2001.
- [16] A. Hoover, <http://www.ces.clemson.edu/~ahoover/stare>.
- [17] João V. B. Soares, Jorge J. G. Leandro, Roberto M. Cesar Jr., Herbert F. Jelinek, and Michael J. Cree, “Retinal Vessel Segmentation Using the 2-D Gabor Wavelet and Supervised Classification”, *Ieee Transactions on Medical Imaging*, Vol. 25, No. 9, pp. 1214-1222, September 2006.
- [18] E. Ricci and R. Perfetti, "Retinal Blood Vessel Segmentation Using Line Operators and Support Vector Classification", *IEEE Transactions on Medical Imaging*, Vol. 26, No. 10, pp. 1357-1365, October 2007.
- [19] B. Shu Yan Lam and H. Yan, "A Novel Vessel Segmentation Algorithm for Pathological Retina Images Based on the Divergence of Vector Fields", *IEEE Transactions on Medical Imaging*, Vol. 27, No. 2, pp. 237-246, February 2008.
- [20] R. Pourreza, H. Pourreza, T. Banaee, "Segmentation of Blood Vessels in Fundus Color Images by Radon Transform and Morphological Reconstruction", *Third International Workshop on Advanced Computational Intelligence August 25-27, 2010 - Suzhou, Jiangsu, China*, pp. 522-526.