



Bir Mobil Sistemde Proliferatif Olmayan Diyabetik Retinopatinin Derin Tanısı

Deep Diagnosis of Non-Proliferative Diabetic Retinopathy in a Mobile System

Bekir DİZDAROĞLU
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Karadeniz Teknik Üniversitesi
Trabzon, Türkiye
bekir@ktu.edu.tr

Bilal ÇORBACIOĞLU
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Karadeniz Teknik Üniversitesi
Trabzon, Türkiye
bilalcorbacioglu@gmail.com

Özetçe—Bu çalışmada proliferatif olmayan diyabetik retinopatinin derin tanısı için mobil tabanlı bir sistem önerilmektedir. Bu sistemde, ilk olarak, akıllı telefona monte edilen mikro mercek vasıtasıyla ardışık olarak çekilen fundus görüntüleri sunucuya gönderilecektir. Daha sonra, görüntüler sunucuda kaynaştırılacak ve bazı görüntü ön işleme adımlarından sonra, fundus görüntüsündeki patolojik bölgelerin sınıflandırılması yapılacaktır. Sınıflandırma işlemi için derin evrimsel sinir ağı yaklaşımı dikkate alınacaktır. Sistem şu anki hali ile proliferatif olmayan diyabetik retinopatinin orta evresindeki sert eksudaları algılama işlemini bir bulut ortamında gerçekleştirmektedir. Çalışmanın ileriki aşamalarında anormal fundus görüntülerinde diğer bozukluklarının algılanması için bulut ortamında çalışan yarı otomatik mobil tabanlı bir derin tanı sistemi gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler — şeker hastalığı; diyabetik retinopati; derin tanı; proliferatif olmayan diyabetik retinopati; mikroanevrizma; retina içi kanama; sert eksuda; yumuşak eksuda; mobil sistem.

Abstract— In this study, a mobile based system is presented for deep diagnosis of non-proliferative diabetic retinopathy. In this system, firstly, fundus images taken sequentially via the microlens mounted on the smartphone will be sent to the server. The images will then be fused in the server and after some image preprocessing steps, the pathological regions in the fundus image will be classified. For the classification process, the deep convolutional neural network approach will be considered. The system, in its current state, performs detection of hard exudates in the moderate state of non-proliferative diabetic retinopathy in a cloud environment. In the later phases of the study, it is planned to implement a semi-automated mobile-based deep diagnostic system that performs in the cloud environment to detect other abnormalities in abnormal fundus images.

Keywords — diabetes mellitus; diabetic retinopathy; deep diagnosis; nonproliferative diabetic retinopathy; mikroaneurizm; intraretinal hemorrhage; hard exudate; soft exudate; mobile system.

I. GİRİŞ

Şeker hastalığı, vücuttaki dokuların insüline direnmesine veya insülin yetersizliğine bağlı olarak ortaya çıkan ve kandaki

şeker miktarının yükselmesiyle hızla ilerleyen bir rahatsızlıktır. Şeker hastalığı, diyabetik retinopati (DR) diye adlandırılan görme kaybı en başta olmak üzere, böbrek fonksiyon bozukluğu, kalp krizi ve felç gibi vücutta ciddi olumsuz sonuçlara yol açabilmektedir. Günümüzde bu hastalık iki tip altında irdelenmektedir: Tip I şeker hastalığı daha çok genç yaşta insanları etkilemekte, görülme sıklığı daha az, vücuttaki insülin yetersizliğine bağlı olarak ortaya çıkmakta ve tedavisi için insülin kullanılmaktadır. Tip II şeker hastalığı ileri yaşta insanlarda görülmekte ve daha yaygındır. Bu hastalara ise ilaç tedavisi uygulanmaktadır.

Retina tabakasındaki patolojik bölgelerin taranmasıyla şeker hastalığının tespiti kolay bir şekilde yapılabildiğinden fundus görüntüleme tanı konulmasında dikkate alınan önemli tekniktir [1]. Ayrıca bu görüntüleme tekniği ameliyatsız bir şekilde göz hastalıklarını tarama yaklaşımı olarak da düşünülebilir. Fakat tarama tekniği ile hastalığın teşhis edilebilmesi, uygun bir şekilde fundus görüntüsünün çekilmesine ve bu tür görüntülere imge işleme tekniklerinin başarılı bir şekilde uygulanmasına bağlıdır. Şeker hastalığına yakalanmış hastaların tamamının taranmasının yapılması için dünya sağlık örgütüne göre yılda yaklaşık 30 milyon fundus görüntüsünün incelenmesi gerekmektedir [2]. Bu durum bir dezavantajmış gibi görünmesine rağmen, oldukça çok miktardaki fundus görüntüleri, literatürde son zamanlarda geliştirilen derin öğrenme teknikleri [3] kullanılarak işlendiğinde, patolojik bölgelerdeki hastalıklara, uzman hekimleriyle karşılaştırıldığında, daha doğru teşhis konulmasına olanak sağlanmaktadır. Klasik imge işleme yaklaşımları [4] genelde başarılı sonuçlar üretmesine rağmen, eğer girdi verileri oldukça fazla olursa, makine öğrenmesine bağlı derin tıbbi teknikler neredeyse yüzde yüze yakın doğru tanı konulmasına olanak sağlamaktadır. Fakat bu yaklaşımlardaki algoritma ve işlem karmaşıklıkları, veri madenciliği uygulamalarının, klasik dizüstü veya masaüstü gibi PCler yerine, sunucularda koşulmasını gerektirmektedir.

Bu çalışmada, tedavisi zamanında yapılamaz ise, körlüğe neden olabilecek proliferatif olmayan diyabetik retinopati

(NPDR) tanısı için derin öğrenme tabanlı ve platformdan bağımsız bir mobil sistemin nasıl geliştirilebileceği üzerine bir irdeleme yapılmıştır. Daha önce geliştirdiğimiz mobil tabanlı bir sistemde retina tabakasındaki patolojik bölgelerde sert eksudaların basit bir yaklaşımla nasıl tespit edilebileceğine dair bir çalışma önerilmiştir [5]. Literatürde aslında akıllı telefon tabanlı fundus görüntüleme teknikleri geliştirilmiştir [6, 7]. Bu çalışmalarda taşınabilir tanı cihazlarıyla elde edilen fundus görüntüleri, taşınmaz ve nispeten pahalı olan klasik tanı cihazlarıyla elde edilen fundus görüntülerine göre kalite bakımından biraz daha düşüktür. Ayrıca taşınabilir cihazlarla üretilen görüntülerdeki retina tabakasındaki bozuklukların daha iyi teşhis edilebilmesi için, peş peşe çekilen görüntülerinin kaynaştırılması işlemi de gerçekleştirilmektedir [7]. Diğer taraftan, DR bozukluklarının algılanması için klasik yapay sinir ağı algoritması kullanılarak mobil tabanlı bir sistem de geliştirilmiştir [8]. Fakat bu sistemde sadece anormal ve normal görüntülerin ayrıştırılması yapılmış, başka bir ifadeyle DRyi oluşturan bozukluk tiplerinden bahsedilmemiştir. Ayrıca benzer bir çalışmada da derin öğrenme ağ mimarisine dayalı MobileNets ile fundus görüntülerinin sınıflandırılması yapılmıştır [9].

Önerilen çalışma, literatürdeki yaklaşımlardan farklı olarak NPDRde her bir evredeki farklı belirtilerin sınıflandırılması için aşağıdaki mimariye sahip mobil tabanlı bir sistem içerecektir:

- ✓ Mobil uygulama,
- ✓ Web sitesi,
- ✓ Web servisi,
- ✓ Veritabanı sunucu,
- ✓ Görüntü işleme ve
- ✓ Derin öğrenme.

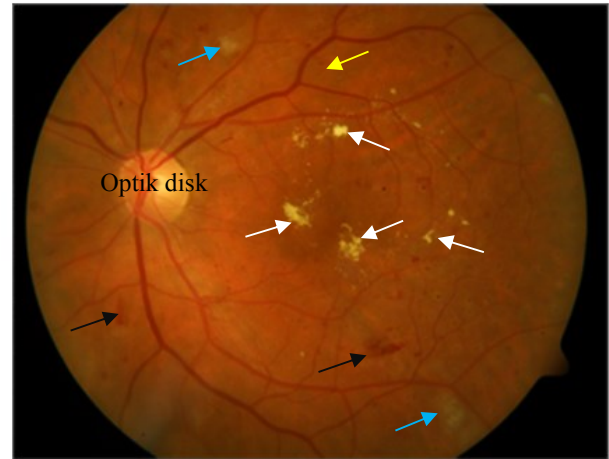
Önerilen çalışmada ele alınan yaklaşımların ayrıntılara aşağıdaki bölümlerde ele alınmıştır.

II. PROLİFERATİF OLMAYAN DİYABETİK RETİNOPATI (NPDR)

DR, şeker hastalığına bağlı retina tabakasındaki bozukluktur ve eğer hastaya tedavi uygulanmazsa, hastalığın ileriki aşamalarında körlüğe neden olabilmektedir. Şekil 1'de gösterildiği gibi, DRnin başlangıç aşamasında görünür bir belirti olmamasına rağmen, hastalığın ilerlemesi durumunda bu belirtilerin sayısı ve yan etkileri ciddi derecede artmaktadır [1]. DR, tipik olarak retina tabasındaki kılcal damarlarda küçük değişikliklerle başlar. Çok küçük boyutlu, 12-125 µm çapında, koyu kırmızı ve yuvarlak şekilde ortaya çıkan ve ilk tespit edilebilen klinik bulguya mikroanevrizma adı verilir (Bakınız Şekil 1 ve 2.a). Bu bozukluk, retina tabakasındaki kılcal damarlarda boy gösterir ve hastalığın daha sonraki aşamasında mikroanevrizmaların yırtılmasıyla nispeten küçük boyutlu, koyu kırmızı, nokta ve alev şeklinde görülen hemoraji adı verilen retina içi kanamalara sebep olur (Bakınız Şekil 1ve 2.b). Bu aşamadaki hastalık hafif NPDR evresi olarak sınıflandırılır. Başka bir ifadeyle, bu evre, NPDR başlangıcıdır ve bu aşamada mikroanevrizmalar ve az sayıda nispeten küçük boyutlu retina içi hemorajiler görülür. Zamanla, kılcal damar duvarlarının geçirgenliğine bağlı olarak retina ödemi ve zayıflamış kan

damarlarından sızan lipit birikimli, keskin sınırlı, küçük veya büyük boyutlu, sarı ve küme veya halka şeklinde sert eksudalar ortaya çıkar (Bakınız Şekil 1ve 2.c). Hastalığın bu evresi orta NPDR olarak adlandırılır. Ayrıca, bu belirtiler makula bölgesinde olursa, makula ödemi olarak da adlandırılır. DR ilerledikçe, retina tabakasındaki kan damarları pıhtıdan dolayı tıkanmaya başlar. Bu küçük tıkanmalar, nispeten orta boyutlu, beyazımsı, bulanık kenarlı oval şekildedir ve yumuşak eksuda olarak adlandırılır (Bakınız Şekil 1ve 2.d). Mikroanevrizmalar, nispeten büyük boyutlu retina içi hemorajiler ve sert eksudalar gibi bozuklukların oldukça fazla olması durumu ağır NPDR evresi olarak adlandırılır [1].

Retina tabakasında oksijen eksikliğinden dolayı yeni damarların oluşmasıyla ağır NPDR evresi hızlı bir şekilde proliferatif diyabetik retinopati (PDR) evresine dönüşebilir. Bu durum neovaskülarizasyon olarak adlandırılır. Bu aşamadan sonra hastada ani görme kayıpları ve sonrasında kalıcı körlük meydana gelebilir. Bu durumda hastanın göz doktoru tarafından izlenmesi gerekmektedir. Bu yüzden literatürdeki çoğu çalışmada genelde NPDR evreleri irdelenmektedir. Bu evrelerdeki tarama işlemlerinde iyi bir görüntü işleme algoritmasıyla NPDR belirtileri sınıflandırılabilir [1].

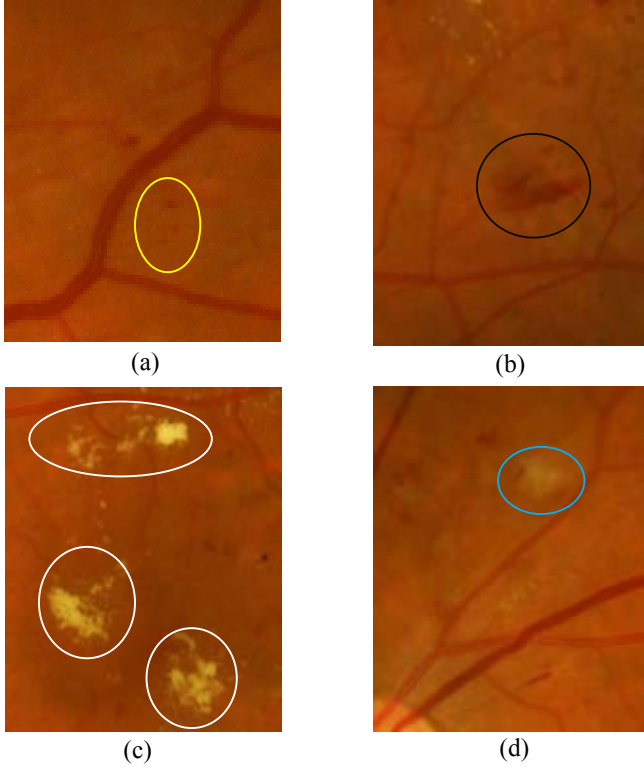


Şekil 1. Proliferatif olmayan diyabetik retinopati belirtileri içeren fundus görüntüsü: Mikroanevrizma (sarı ok), retina içi hemoraji (siyah oklar), sert eksuda (beyaz oklar) ve yumuşak eksuda (mavi oklar). Fundus görüntüsü <http://www.it.lut.fi/project/imageret/diaretdb1/www-resources/html/image015.htm> adresinden indirilmiştir

Tıbbi tanı işlemlerinde, tıbbi girdi verileri genelde hastalık var ya da hastalık yok şeklinde iki sınıfa ayrılmaktadır. Tanı sınıflandırma doğruluğu ise, duyarlılık ve özgüllük ölçütleri dikkate alınarak değerlendirilmektedir. Fundus görüntülerindeki patolojik bölgelerin sınıflandırılması bu yaklaşımlar kullanılarak yapılmaktadır. Tarama işlemlerinde, duyarlılık, anormal olarak sınıflandırılan anormal fundus görüntülerinin yüzdeliği ve özgüllük ise, normal olarak sınıflandırılan normal sınıfların yüzdeliğidir. Daha yüksek duyarlılık ve özgüllük değerleri daha iyi tanı konduğunun göstergesidir [1]. Duyarlılık ve özgüllük değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\text{duyarlılık} = \frac{D_P}{D_P + Y_N} \text{ ve } \text{özgüllük} = \frac{D_N}{D_N + Y_P}, \quad (1)$$

burada D_p anormal fundus görüntülerindeki anormallerin sayısı, D_N normal fundus görüntülerindeki normallerin sayısı, Y_p normal fundus görüntülerindeki anormallerin sayısı ve Y_N ise anormal fundus görüntülerindeki normallerin sayısıdır [1].



Şekil 2. Proliferatif olmayan diyabetik retinopati belirtileri: a) mikroanevrizmalar, b) retina içi hemoraji, c) sert eksudalar ve d) yumuşak eksuda

DRnin tanısı iki kategori altında toplanabilir:

- ✓ Tarama ve
- ✓ İzleme.

Çoğu otomatik sistemler, direkt olarak DR bulgularını şekil, renk ve domain verilerini kullanır. Diğer taraftan patolojik bölgeler, aynı gözden farklı zamanlarda elde edilen fundus görüntülerindeki değişiklikler algılanarak da bulunabilir. DRnin tanısı için, doğrudan yaklaşımda tarama, doğrudan olmayan yaklaşımda ise hem tarama hem de izleme işlemleri dikkate alınmaktadır. Her iki yaklaşımda da girdi imgesine benzer görüntü işleme adımları uygulanmaktadır: görüntü iyileştirme, DR bölgelerini algılama ve sınıflandırma [1].

Bazı yaklaşımlarda fundus görüntülerindeki optik disk, kan damarları ve makula gibi normal bölümlerin de algılanması yapılmaktadır. Çünkü normal bölgeler de anormal bölgeler gibi farklı renk ve parlaklık bilgileri içermektedir. Bu yüzden algılama aşamasında normal bölgelerin önceden tespit edilerek anormal bölgelerle karıştırılması önlenmiş olmaktadır. Örneğin, Şekil 1'de gösterildiği gibi, arka planla karşılaştırma yapıldığında, optik disk bölgesi de patolojik bölgelerde olduğu gibi farklı renk bilgisi içermektedir.

III. MOBİL SİSTEM

Fundus görüntüsündeki NPDR belirtilerini sınıflandıracak olan mobil tabanlı sistem aşağıda detaylandırılan modülleri içermektedir. Bazı modüller çalışmanın ileriki aşamalarında gerçekleştirilecektir.

A. Mobil Uygulama

IOS ve Android işletim sistemlerini destekleyen bir mobil uygulama geliştirilerek, göz doktorunun ya da herhangi bir uzman hekimin akıllı cihaza monte edilmiş mikro mercek aracılığıyla çektiği fundus görüntülerini bulut sistemine aktarılması yapılacaktır. Sistemde görüntülerin iyileştirilmesi ve kaynaştırılması için ön görüntü işleme modülü ve daha sonra derin evrimsel sinir ağı yaklaşımıyla NPDR belirtilerinin sınıflandırılmasının yapılması için bir derin öğrenme modülü olacaktır. Burada Javascript dilinin esnekliğinden, hızından ve platform bağımsızlığından yararlanabilmek için React Native teknolojisi dayalı bir mobil uygulaması geliştirilecektir.

B. Web Sitesi

Hastalar, sisteme bulut ortamdaki sunucular vasıtasıyla erişebilmektedir. Web sitesi vasıtasıyla, mobil uygulamada yapılabilecek tüm işlemler aynıyla gerçekleştirilebilir, daha geniş ekran geçeneğiyle hastaya ait sonuçların detaylı bir şekilde irdelenmesi de yapılabilir. Web sitesine erişirken ağ yükü dengeleyiciler ile sistemin yoğunluğuna göre istekler birbirinin kopyası olan web sitesi sunucularına yönlendirilmektedir. Web sitesi Linux sunucularında barındırılmaktadır ve NodeJS dili kullanılarak geliştirilmiştir. Şu anki uygulamada hastalar kayıtlarını yapabilmekte, fundus görüntülerini yükleyebilmekte ve daha sonra görüntünün basitçe analizi gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca uygulama, yönetici panelinde, göz doktorlarına ait verilerin girilebileceği bir arayüzü de içermektedir. Hâlihazırda platformdan bağımsız web sitesine <https://retina.herokuapp.com/> adresinden erişilebilir. Web sitesindeki uygulamayla yüklenen fundus görüntüdeki sert eksudalar, Şekil 3'de gösterildiği gibi, algılanabilmektedir. Burada daha önceki çalışmamızdaki yaklaşımlar [5] kullanılmaktadır.

C. Web Servisi

Mobil uygulama ile Web sitesinin haberleşmesinin hızlı yapılabilmesi için RESTful web servisi kullanılmaktadır. Bu servisin önerilen bulut sisteminde birden fazla görevi vardır, ama temel amacı, mobil uygulama ve web sitesi arasında bir köprü sağlamaktır. RESTful tüm koordinasyonun döndüğü merkezi birimdir. Hastanın verilerinin iletilmesini ve görüntülerin AmazonS3e aktarılmasını sağlamak gibi işlemlerin ana akışını düzenler. Burada SOAPdan çok daha performanslı çalıştığından ötürü RESTful kullanımı tercih edilmiştir.

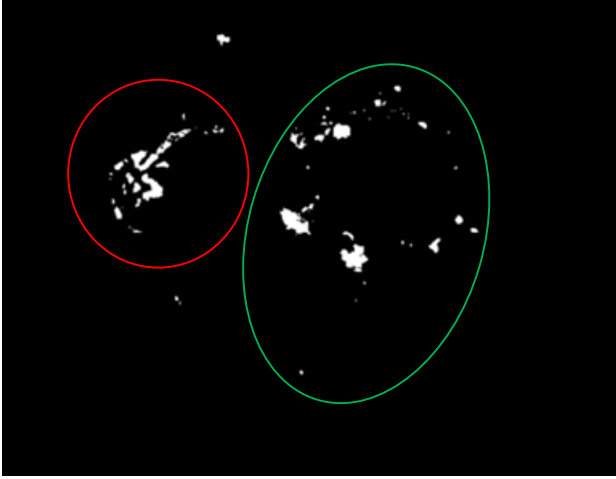
D. Veritabanı Sunucusu

Verileri depolamak için şimdilik ilişkisel bir veritabanı olan MySQL ve loglama sisteminde ise NoSQL bir veritabanı olan MongoDB seçilmiştir. Burada görüntü bilgileri ve analizleri MySQL veritabanında tutulmaktadır.

E. Görüntü İşleme

Bu kısımda, RESTful aracılığı ile iletilen görüntüler, kaynaştırma, normalizasyon ve iyileştirme gibi ön işlemlere tabi tutulacaktır.

Ayrıca çalışmanın ileriki aşamalarında hastalara ait fundus görüntülerinin saklanması AmazonS3 bulut depolama hizmetinden yararlanılacaktır.



Şekil 3. Proliferatif olmayan diyabetik retinopati belirtileri içeren fundus görüntüsündeki sert eksudaların algılanması (yeşil renkle işaretlenen bölge): Dikkat edilirse, optik disk çevresi de hatalı bir şekilde sert eksuda olarak algılanmıştır (kırmızı renkle işaretlenen bölge). Duyarlılık ve özgüllük değerleri de veri seti tam olarak işleme tabi tutulduğunda hesaplanacaktır

F. Derin Öğrenme

Görüntü ön işleme modülü koşulduktan sonra, ilgili görüntü erişilebilir bir bulut servisi olan Amazon derin öğrenme modülüne iletir. Bu modülde temel olarak patolojik bölgelerin sınıflandırılması yapılacaktır.

Derin öğrenme yaklaşımlarında klasik yöntemlerle karşılaştırıldığında daha başarılı sonuçlar elde etmek için veri setinin oldukça fazla fundus görüntüsü içermesi gerekmektedir. Bu bağlamda 35126 fundus görüntüsü içeren Kaggle veri seti kullanılacaktır. Bu veri setinde, ilk olarak, görüntülerin kırılması (yararlı bilgi içermeyen arkaplanın giderilmesi), yeniden boyutlandırılması (görüntülerin boyutlarının eşitlenmesi) ve kontrastının iyileştirilmesi (adaptif histogram eşitlemeyle görüntünün netleştirilmesi) gibi ön işlem adımları gerçekleştirilmektedir. Ayrıca her bir sınıfın eşit miktarda fundus görüntüsü içermesi için görüntüler ölçekleme, döndürme, yatay ve dikey çevirme gibi geometrik işlemlere tabi tutulmaktadır [10]. Fundus görüntülerinin sınıflandırılması için genelde derin evrimsel sinir ağı dikkate alınmaktadır. Bu çok katmanlı ağ yapısının mimarisini evrimsel katman (görüntülerden öz nitelik çıkartma-süzgeçleme), toplu normalleştirme katmanı (aşırı uydurmayı önleme-düzenleştirme), aktivasyon katmanı (doğrusalsızlık-ReLU fonksiyonu), havuzlama katmanı (alt örnekleme), düşürme katmanı (aşırı uydurmayı önleme-düzenleştirme), düzeltme katmanı (matrisi vektöre dönüştürme), yoğun katman (doğrusallaştırma) ve sınıflandırma katmanı (softmax fonksiyonu) oluşturmaktadır. Burada derin evrimsel sinir ağının daha hızlı eğitilmesi için, fundus görüntülerindeki arkaplan, optik disk, makula ve kan damarları gibi normal bölümlerin çıkartılarak, girdi olarak sadece patolojik bölgeleri içeren görüntülerin dikkate alınması düşünülmektedir.

IV. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada derin evrimsel sinir ağı yaklaşımı kullanılarak mobil cihazlara monte edilen mikro mercekli aparat, D-Eye [11], vasıtasıyla çekilen fundus görüntülerinin sunucuda bazı ara işlem adımlarından sonra şeker hastalığına bağlı olarak sınıflandırılmasının yapılması planlanmaktadır. Fakat burada şu sorular akla gelmektedir: Akıllı cihazla çekilen fundus görüntüler, fundus kameraları ile çekilenlerden daha kalitesiz olmayacak mı? Derin evrimsel sinir ağı fundus kameraları ile çekilen görüntüleri ile eğitilecek, ama akıllı cihazla çekilen fundus görüntüsü nasıl sınıflandırılacak? Sınıflandırma işlemi neden akıllı telefonda yapılmayacak? Tabi ki akıllı telefonla çekilen görüntülerin kalitesi düşük olacak, ama peş peşe birkaç görüntü çekimi yapıldıktan sonra bu görüntüler kaynaştırılacak [7], bazı ön görüntü işleme adımlarına tabi tutulacak ve daha sonra sunucuda sınıflandırma işlemi gerçekleştirilecektir. Mobil tabanlı uygulamalarda, fundus kameraları ile çekilen görüntüler kullanılarak derin evrimsel sinir ağı sunucuda eğitim işlemine tabi tutulduktan sonra, sadeleştirilerek ve eniyenerek akıllı cihaza aktarılmakta ve test işlemlerinde kullanılmaktadır [9]. Akıllı cihazdaki ağ yapısı eniyendirildiğinden, akıllı cihazda sınıflandırma işlemi belki hızlı bir şekilde yapılabilir, ama doğru sınıflandırma oranının düşeceği açıktır.

Bulut ortamında çalışacak bu derin tanı yaklaşımımızın ülkemizde özellikle kırsal kesimlerdeki göz doktorlarının ve aile hekimlerinin oldukça işine yarayacağı kanaatindeyiz.

KAYNAKLAR

- [1] Kauppi, T., et al. "The diaretdb1 diabetic retinopathy database and evaluation protocol." *BMVC*. Vol. 1. 2007.
- [2] Topol, E. *Deep Medicine: How Artificial Intelligence Can Make Healthcare Human Again*. Basic Books, New York, March 2019.
- [3] Gulshan, Varun, et al. "Development and validation of a deep learning algorithm for detection of diabetic retinopathy in retinal fundus photographs." *Jama* 316.22 (2016): 2402-2410.
- [4] Sopharak, Akara, Bunyarit Uyyanonvara, and Sarah Barman. "Automatic exudate detection from non-dilated diabetic retinopathy retinal images using fuzzy c-means clustering." *Sensors* 9.3 (2009): 2148-2161.
- [5] Çorbacıoğlu, Bilal, et al. "Göz hastalıklarının tanısı için mobil tabanlı sistem.", *TIPTEKNO 2017*, Trabzon.
- [6] Bastawrous, Andrew, et al. "Clinical validation of a smartphone-based adapter for optic disc imaging in Kenya." *JAMA ophthalmology* 134.2 (2016): 151-158.
- [7] Kim, Tyson N., et al. "A smartphone-based tool for rapid, portable, and automated wide-field retinal imaging." *Translational vision science & technology* 7.5 (2018): 21-21.
- [8] Bourouis, Abderrahim, et al. "An intelligent mobile based decision support system for retinal disease diagnosis." *Decision Support Systems* 59 (2014): 341-350.
- [9] Suriyal, Shorav, Christopher Druzgalski, and Kumar Gautam. "Mobile assisted diabetic retinopathy detection using deep neural network." 2018 *Global Medical Engineering Physics Exchanges/Pan American Health Care Exchanges (GMEPE/PAHCE)*. IEEE, 2018.
- [10] Singh, Munendra. "Classification of diabetic retinopathy stages using deep learning.", *Master of technology*, Indian Statistical Institute, India, 2018.
- [11] Russo, A., et al. "Comparison of smartphone ophthalmoscopy with slit-lamp biomicroscopy for grading diabetic retinopathy." *American Journal of Ophthalmology* 159.2 (2015): 360.